

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS LUAN BOLL

**INFLUÊNCIA DO TIPO DE TURBINA E TOMADA D'ÁGUA NA CAPACIDADE DE
GERAÇÃO DAS USINAS HIDRELÉTRICAS**

MEDIANEIRA

2022

LUCAS LUAN BOLL

**INFLUÊNCIA DO TIPO DE TURBINA E TOMADA D'ÁGUA NA CAPACIDADE DE
GERAÇÃO DAS USINAS HIDRELÉTRICAS**

**Influence of the type of turbine and water intake in the generation capacity of
the hydropower plant**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Evandro André Konopatzki.

MEDIANEIRA

2022



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

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

LUCAS LUAN BOLL

**INFLUÊNCIA DO TIPO DE TURBINA E TOMADA D'ÁGUA NA CAPACIDADE DE
GERAÇÃO DAS USINAS HIDRELÉTRICAS**

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

Data de aprovação: 20/junho/2022

Evandro André Konopatzki
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Yuri Ferruzzi
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Thiago Naufal Santelo
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

MEDIANEIRA

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Evandro André Konopatzki por todo apoio, toda a força para que esse trabalho fosse possível e pela sua dedicação em todos os momentos nos quais foram necessários sua intervenção e estudos.

Ainda agradeço meus colegas de engenharia elétrica, em especial todos aqueles em todos os momentos de estudo e apoio se transformaram em grandes amigos, onde mesmo a distância nunca se deixaram de estar presentes.

Agradeço também a Universidade Tecnológica Federal do Paraná onde houve a oportunidade de capacitação profissional através deste curso de graduação em Engenharia Elétrica.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento aos meus pais e ao meu irmão onde mesmo em momentos de dificuldade no decorrer desta graduação, nunca deixaram de estar ao meu lado e entregaram todo o apoio para que pudesse chegar até aqui.

Enfim, a todos que estiveram por perto nestes momentos e não foram mencionados acima, deixo os sinceros, muito obrigado.

RESUMO

A busca pelo melhor aproveitamento da energia contida na água é de suma importância para a maior geração de energia elétrica, tratando-se da qual o país possui uma matriz energética de energia elétrica baseada nas hidrelétricas. A turbina hidráulica é o elemento principal por onde a água passa e é nela que ocorre a conversão de energias para posteriormente transformar em energia elétrica. Caso o reservatório tenha uma redução de armazenamento e o ponto de tomada d'água fique acima do nível do reservatório, a usina chega em seu ponto de esgotamento de produção de energia. O trabalho proposto verificou a otimização da capacidade de potência instalada em uma usina hidrelétrica com a utilização de diferentes modelos de turbinas e variação do ponto de tomada d'água. Foram verificados os efeitos dos modelos de turbina Francis, Kaplan e Pelton e as diferentes alturas de tomada d'água na potência elétrica instalada das usinas, usando a vazão e queda bruta d'água da usina hidrelétrica Binacional de Itaipu como estudo de caso. Para a realização deste trabalho foram coletados os dados construtivos da barragem existente. Com os resultados obtidos nessa pesquisa, de que existe similaridade matemática entre os modelos de turbina usados, a capacidade da turbina depende do seu rendimento total e a capacidade de geração de energia elétrica está diretamente atrelada à queda bruta de água. Foi possível concluir que o estudo de caso observado manteve a mesma capacidade de geração para todos os cenários simulados, o que permite concluir que o projeto da usina hidrelétrica de ITAIPU foi realizado de forma a otimizar sua capacidade de geração de energia quanto aos critérios tomada d'água e tipo de turbina.

Palavras-chave: turbinas hidráulicas; usina hidrelétrica; energia elétrica.

ABSTRACT

The best use of energy contained in the water is a search extremely important for the greatest generation of electricity, mainly in a country where an energy matrix of electrical energy is based on hydropower. The hydraulic turbine is the principal element where water crosses and energy conversion occurs to transform it into electrical energy later. If the reservoir has storage and the water intake point is above the reservoir level, the plant reaches its end of life. This research will check the optimization of the installed power capacity in a hydropower plant using different models of turbines and intake point of water variation. The effects of Francis, Kaplan and Pelton turbine models and the different intake heights of water on the installed electrical power of the plants were verified, using flow and gross water head of the Binacional de Itaipu hydropower plant as a case study. For the accomplishment, this study uses constructive data of the existing dam. With the results obtained in this research, that show a mathematical similarity between turbine models used, the turbine capacity depends on its total efficiency and the electrical energy generation capacity is directly linked to the gross water head. It was possible to imply that this case study maintained the same generation capacity for all simulated settings, which allow us to conclude that the ITAIPU hydropower plant project was implemented in order to optimize its energy generation capacity in terms of criteria water intake and turbine type.

Keywords: water turbines; hydropower plant; electrical energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Oferta de energia elétrica por fonte no Brasil.....	16
Figura 2 – Corte de barragem com detalhamento da tomada d'água.	18
Figura 3 – Esquema de padrão construtivo de uma usina hidrelétrica.....	19
Figura 4 – Desgaste da turbina e efeitos de restauração e de repotenciação.	23
Figura 5 – Modelos de rotores da turbina Francis.....	24
Figura 6 – Principais elementos da turbina Francis.....	25
Figura 7 – Representação da turbina modelo Kaplan.	26
Figura 8 – Detalhamento dos elementos da turbina Kaplan.....	27
Figura 9 – Turbina tipo Pelton instalada na usina.	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação dos impactos ambientais entre UHE e UTE.....	20
Tabela 2 – Aproveitamento hídrico por bacias brasileiras.	22
Tabela 3 – Resultados da Simulação das Cotas na Turbina Francis.....	36
Tabela 4 – Resultados da Simulação da Cota 186,62 nas 3 Turbinas.....	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	FUNDAMETAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1	Matriz de Energia Elétrica Brasileira.....	15
2.2	Geração de Energia Hidráulica.....	17
2.2.1	Capacidade Hídrica no Brasil	21
2.3	Turbinas Hidráulicas	23
2.3.1	Turbina Francis.....	24
2.3.2	Turbina Kaplan	26
2.3.3	Turbina Pelton	28
3	PROCESSO METODOLÓGICO	31
3.1	Tipo de Pesquisa	31
3.2	Métodos.....	31
3.3	Aplicação da Metodologia	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1	Influência da Cota de Tomada D'Água	35
4.2	Turbina Hidráulica para Otimização da Capacidade de Geração	37
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	39
5.1	Considerações Finais	39
5.2	Trabalhos Futuros	39
	REFERÊNCIAS.....	41
	APÊNDICE A - Simulação para Análise de Influência da Tomada D'Água	44
	APÊNDICE B - Simulação para Análise da Turbina Hidráulica	48

1 INTRODUÇÃO

A sociedade depende da energia elétrica, tanto para o seu dia a dia, quanto para a produção dos seus bens de consumo, sejam eles de qualquer natureza, como a alimentação, lazer ou mesmo para o seu transporte. Ao olhar para algum objeto é comum imaginar as matérias primas que foram necessárias para construir, mão-de-obra, logística de transporte até o ponto de venda e o dinheiro que circula pela compra e venda do objeto, porém, por mais que não seja visível, existe um gasto de energia elétrica em qualquer elemento que é fabricado, mesmo que muitas vezes esse detalhe não seja recordado.

Segundo o (EPE, 2019a), o Brasil teve um consumo de 474.820 GWh no ano de 2018, porém assim como a distribuição da população, o consumo de energia elétrica também não é uniforme no território nacional, mais de 50% da energia consumida foi registrada na região Sudeste do país, enquanto na região Norte representou apenas 6,8% do consumo nacional.

Assim como o consumo de energia elétrica é desigual no Brasil, a geração de energia através das usinas hidrelétricas também é desigual. A região que tem o menor aproveitamento hídrico, comparado a geração de energia da região com o potencial existente na mesma, é a região Sudeste com aproximadamente 40,8% e a região Norte é a segunda região com o melhor aproveitamento da sua capacidade, com 67,22% (ELETROBRAS, 2018a).

Os principais elementos de uma usina hidrelétrica são: a barragem, o reservatório e a turbina. A escolha da turbina correta tem uma importância muito grande pois, o custo de implementação de uma nova usina é muito alto e provoca impactos ambientais significativos como alagamentos de territórios e destruição da fauna e da flora local. Para isso é essencial dimensionar corretamente a turbina para o modelo que melhor aproveitará a energia cinética da água. Os modelos mais tradicionais de serem usados são: a turbina Francis, Kaplan e Pelton.

A principal fonte de energia elétrica no Brasil são as hidrelétricas, através disso é possível questionar quanto a eficiência atual destas usinas, ao melhorar o aproveitamento de energia da água, a consequência é produzir mais energia elétrica com o volume de água, ou seja, economiza-se água para produzir mais energia. Ao

mudar o ponto de tomada d'água consegue-se um aproveitamento melhor do reservatório, trazendo mais água para produzir energia e prolongando a vida da usina hidrelétrica.

Partindo do conhecimento do potencial hídrico brasileiro existente juntamente com seu aproveitamento e a importância da otimização da produção de energia elétrica que este trabalho de pesquisa se baseia. Após uma análise de produção de energia elétrica entre os modelos de turbina propostos tem-se a hipótese que é possível analisar efeitos da substituição das turbinas das unidades geradoras para verificar a produção e, conseqüentemente, maior aproveitamento da energia potencial gravitacional contida na água do reservatório.

O objetivo geral é verificar a influência dos modelos de turbina Francis, Kaplan e Pelton e da tomada d'água na potência elétrica instalada usando a vazão e queda bruta d'água da usina hidrelétrica Binacional de Itaipu como estudo de caso.

Os objetivos específicos deste trabalho estão apresentados nos tópicos a seguir.

- a) Dimensionar a instalação dos modelos Francis, Kaplan e Pelton adotando dados de vazão e queda bruta d'água da usina hidrelétrica Binacional de Itaipu como referência.
- b) Analisar a variação do ponto de tomada d'água na potência da usina com as turbinas Francis, Kaplan e Pelton.
- c) Apresentar a turbina e o ponto de tomada d'água mais eficientes para a produção de energia elétrica no caso de Itaipu Binacional.

2 FUNDAMETAÇÃO TEÓRICA

Nesta secção é abordado sobre a fundamentação pela qual este trabalho se baseia para estruturação de estudos.

2.1 Matriz de Energia Elétrica Brasileira

É evidente que cada vez mais a sociedade brasileira é dependente da energia elétrica, tanto nas residências quanto nos comércios e indústrias. Apesar da existência de mais de 72 milhões de residências no Brasil em 2019, os maiores consumidores não são as residências, são as indústrias. Segundo a EPE (2019c) as indústrias representam em 2018 o equivalente a 35,78% do consumo nacional de energia elétrica, enquadrando-se como os maiores consumidores, já as residências representam apenas 28,96% do consumo nacional.

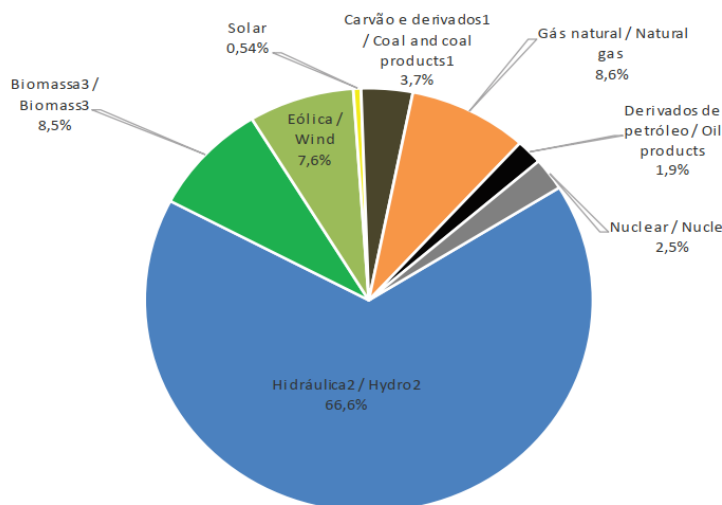
Apesar da diferença de consumo entre indústrias e residências, o país precisa suprir a necessidade de ambos com a eficiência do sistema. Segundo a EPE (2019a), o país teve um aumento de geração de energia elétrica de 2% em 2018 com relação a 2017, fechando o ano com uma produção total de 601 TWh.

A matriz de energia elétrica do Brasil foi planejada de forma a otimizar as fontes renováveis de energia, que representaram em 2018 a quantia de 83,3%, sendo que este valor é a soma de energia elétrica de fonte renovável produzida no país mais as importações de energia deste meio de fonte (EPE, 2019b).

Surge a dúvida de que fonte se encaixa como fonte renovável, e as que pertencem são as consideradas inesgotáveis pela sua capacidade de renovar após serem utilizadas, como exemplo tem-se as fontes hídrica, solar, eólica, biomassa, geotérmica, oceânica e hidrogênio (EPE, 2017).

As fontes renováveis têm uma participação bastante representativa na matriz de energia elétrica. A fonte hídrica é a base da matriz representando 66,6%, mostrando a grande importância de desta fonte ao sistema, como mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Oferta de energia elétrica por fonte no Brasil.



Fonte: BRASIL, 2019b.

Visto a grande participação da geração hídrica na matriz de energia elétrica brasileira, seria ideal pensar em implementar cada vez mais este tipo de usina por ser de resposta imediata ao sistema e por ser uma fonte de energia renovável. Para Bermann (2007), existem várias questões que dificultam a implementação, os principais são os impactos ambientais que a usina hidrelétrica provoca na biodiversidade local onde seria alagado, questões sociais como a população ribeirinha que mora nas margens dos rios e questões democráticas do uso dos recursos hídricos como o aproveitamento do rio para utilização de água potável para as pessoas.

Segundo Mendes (2005) as questões críticas para a implementação de uma nova planta hidrelétrica são os impactos ambientais provocados na implementação e alagamento, e as questões sociais envolvendo a população afetada pelo alagamento das terras. Ao abordar mais sobre os impactos socioambientais, menciona que as terras alagadas pelos reservatórios impactam diretamente na fauna e flora local e geralmente são terras muito férteis para a produção, outro impacto faz com que povos sejam reassentados em outras localidades deixando questões históricas sob as águas e sendo realocados em localidades onde as terras são pobres para a produção de alimentos de sustento próprio.

Comprovando o que os autores anteriores mencionaram sobre os impactos Júnior, Mari, et al (2013) enfatiza os mesmos problemas informando que a implementação causa graves problemas no ambiente local, tanto na fauna como na

fauna, muitas vezes provocando a alteração de um ecossistema inteiro, tudo isso sem contar a necessidade de realocação dos povos que terão suas terras alagadas.

Visto a dificuldade de implementação de novos projetos é que se observa a importância de melhorar a eficiência das turbinas geradoras existentes, pois com o passar dos anos as unidades sofrem estresses e vai perdendo sua eficiência de projeto, ou seja, a eficiência com 10 anos de uso é menor daquela de quando a unidade era nova. Segundo Colnago (2011) as curvas de eficiência das turbinas com o passar dos anos são significativamente menores das curvas dos primeiros anos, isso acontece com o passar de muitos anos, como é o caso de muitas unidades do Brasil.

2.2 Geração de Energia Hidráulica

A geração de energia elétrica através da água é conhecida como geração de energia hidráulica. A energia hidráulica é retirada a partir da energia potencial gravitacional, seja ela obtida de quedas de água originais dos leitos dos rios ou através de reservatórios elevados (ITAIPU, 2010).

Segundo o EPE (2017), a energia elétrica produzida nas usinas hidrelétricas é o aproveitamento das águas dos rios que colocam as turbinas em movimento, transformando assim a energia potencial em energia mecânica rotacional e conseqüentemente em energia elétrica.

Uma usina hidrelétrica necessita alguns elementos construtivos para que haja a produção de energia, para o EPE (2008): "... a estrutura da usina é composta, basicamente, por barragem, sistema de captação e adução de água, casa de força e vertedouro, que funcionam em conjunto e de maneira integrada".

A barragem da usina tem como função a armazenar o insumo para a geração de energia que é a água, outra finalidade é proporcionar o desnível no leito do rio para que tenha energia potencial gravitacional para rotacionar as turbinas (ELETROBRAS, 2017). Podendo ser construída de concreto, terra, rocha ou qualquer combinação possível entre elas.

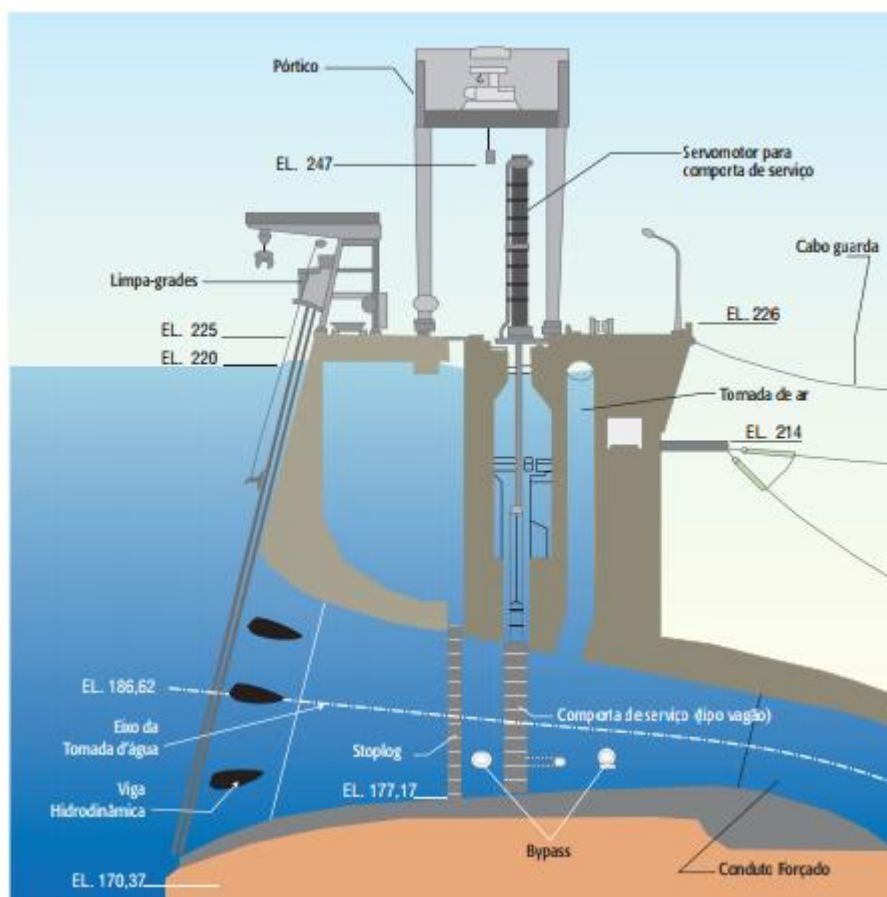
O sistema de captação tem como característica a retirada da água da barragem, onde ela é direcionada para a casa de força através de condutos forçados,

canais ou túneis, e depois de rotacionar a turbina para a geração de energia, a água volta ao curso natural do rio por meio do canal de fuga (CAUS e MICHELS, 2014).

O primeiro lugar pelo qual a água passa pelo sistema de captação é a tomada d'água, que é a perfuração na barragem que faz a ligação entre a água está retida no lago e o conduto forçado pelo qual a água seguirá para o processo de geração de energia.

Para Oliveira (2017), a tomada d'água é projetada para retirar a água do sistema de contenção e conduzido por um sistema de baixa ou alta pressão, ajusta a pressão e segura os detritos vindos pelo escoamento da água para não entrar no sistema de rotação da turbina. A Figura 2 é apresentada para entendimento e demonstração do enfoque da tomada d'água da usina hidrelétrica.

Figura 2 – Corte de barragem com detalhamento da tomada d'água.



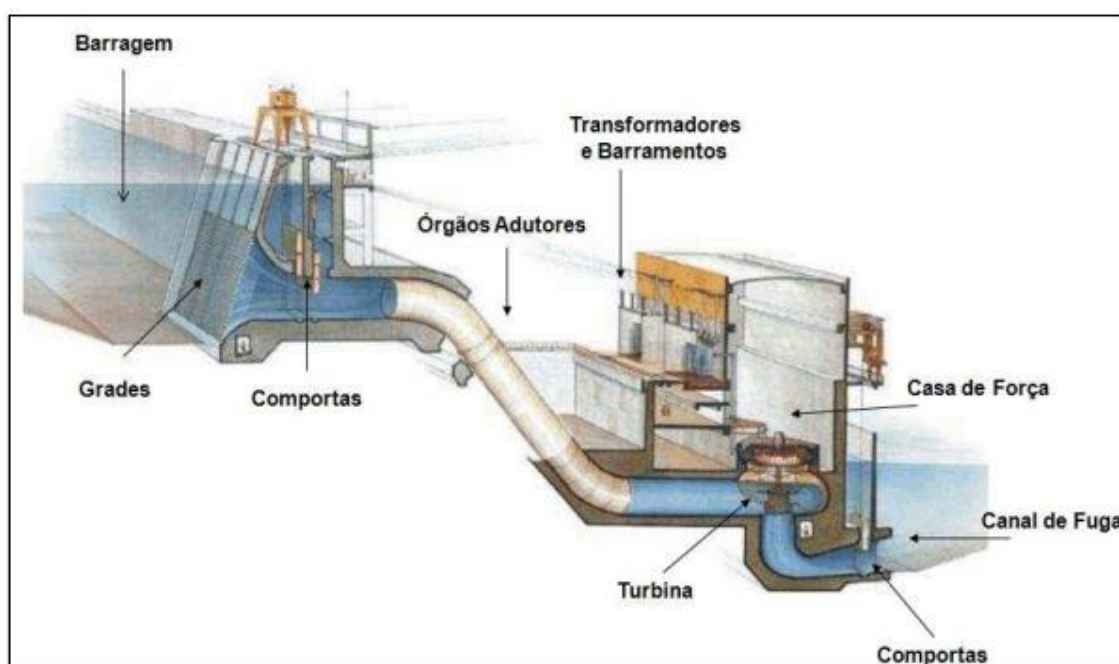
Fonte: ITAIPU, 2017.

A casa de força para (MULLER, 2010) é o principal elemento da usina hidrelétrica, onde é nela que fica situado o conjunto turbina-gerador, que é

responsável pela conversão da energia potencial gravitacional da água em energia elétrica.

O padrão construtivo de cada usina hidrelétrica varia conforme seu projeto, existem os elementos principais, mas cada projeto é desenvolvido conforme estudos realizados na região a ser construída a usina e também depende dos critérios construtivos de equipamentos que serão utilizados. A Figura 3 mostra um esquema de padrão construtivo, identificando os principais elementos apresentados.













































Figura 3 – Esquema de padrão construtivo de uma usina hidrelétrica.



Fonte: MULLER, 2010.

Os impactos ambientais proporcionados pela instalação de uma usina hidrelétrica são dependentes da dimensão de seu projeto, pois a construção tem pouca emissão de gases poluidores, mas tem vários fatores como inundação de território local, ruídos. A Tabela 1 mostra os impactos ambientais de implementação de uma usina hidrelétrica de energia (UHE) em comparação aos de implantação de uma usina térmica (UTE).

Tabela 1 – Comparação dos impactos ambientais entre UHE e UTE.

Impactos Ambientais	Impactos na Implementação		Impactos na Operação	
	UHE	UTE	UHE	UTE
Erosão/Assoreamento				
Recursos Minerais				
Alteração dos Recursos Hídricos				
Inundação				
Emissão CO ₂				
Emissão CH ₄				
Emissão Outros				
Materiais Particulados				
Ruídos				
Efeitos Visuais				
Movimentos Populacionais				

Fonte: Adaptado de GUERRA e CARVALHO, 1995.

Notas: Nulo/Fraco:  Moderado:  Forte: 

É notório que na instalação de uma usina hidrelétrica os impactos ambientais naquela área são grandes, porém, um país que demonstra o interesse em uma matriz energética com a maior parte dela vindo usinas hidrelétricas, possui conhecimento prévio dos problemas ambientais que serão causados. As propriedades físico-químicas da água não são alteradas pelo uso na geração de energia, permitindo o retorno da água ao leito original do rio, os impactos são toleráveis considerando a grande importância da fonte energética e pode-se reduzir os impactos ambientais através de ações mitigatórias (QUEIROZ, GRASSI, *et al.*, 2013).

Analisando pelo panorama de impactos ambientais provocados pela implementação das usinas hidrelétricas e térmicas, na Tabela 1, é visto que a usina hidrelétrica possui mais fatores agravantes do que a usina termelétrica, porém este processo dura um curto tempo comparado com o tempo que esta usina ficará em operação. Já os problemas provocados pela operação, nota-se que a usina hidrelétrica tem um menor impacto especialmente quando focado para a emissão de gases. Os gases CO₂ e CH₄ são os principais gases causadores do efeito estufa, estes juntos contribuem com cerca de 75% da destruição da camada de ozônio. Apesar de

provocar transtornos maiores em sua construção, a melhor opção de usina geradora de energia elétrica olhando pelo foco socioambiental é a usina hidrelétrica.

2.2.1 Capacidade Hídrica no Brasil

O Brasil é um país com extensas áreas territoriais e com isso possui uma grande quantidade de água doce no país, sendo ela superficial ou subterrânea. A água é um recurso natural com seu ciclo bastante complexo, podendo originar de fontes de água subterrânea, precipitação e entrada dos rios de outros países, a utilização pode ser para consumo, higiene e alimentação da população do país, produção de alimentos, produção de bens de consumo, geração de energia elétrica e também pode ter uma destinação natural como a evaporação, a infiltração no solo para os reservatórios subterrâneos e escoamento dos rios para o mar ou outros países (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2019, p. 10).

No Brasil há maior aproveitamento do potencial hídrico nas regiões Sul e Sudeste, isso se deve a densidade demográfica do Brasil, já que para reduzir as perdas na transmissão, a melhor forma é que as usinas se concentrem perto da população.

A energia hídrica é a principal fonte da matriz de energia elétrica do Brasil, possui um aproveitamento desigual do potencial deste recurso natural devido a geografia do país. Pode-se observar através da Tabela 2 que ainda há muito para ampliar o aproveitamento das bacias nacionais pois existe um aproveitamento de 43,62% de toda a capacidade hídrica disponível e também mostra a desigualdade de aproveitamento, onde se tem áreas indo para o esgotamento do potencial hídrico como é o caso da bacia do rio Paraná que está com 69,49%, já a bacia do rio Amazonas tem um aproveitamento ainda baixo, de apenas 24,49%.

Tabela 2 – Aproveitamento hídrico por bacias brasileiras.

Bacia	Total Estimado	Total Inventário	Capacidade Instalada	Total Geral	Índice de Aproveitamento
Rio Amazonas	30.594,79	64.340,13	23.246,43	94.934,92	24,49%
Rio Tocantins	1.874,60	25.061,23	13.252,68	26.935,83	49,20%
Atlântico Norte e Nordeste	706,70	2.198,70	812,00	2.905,40	27,95%
Rio São Francisco	1.560,98	21.044,78	10.785,75	22.605,76	47,71%
Atlântico Leste	1.422,50	12.564,75	5.455,35	13.987,25	39,00%
Rio Paraná	5.085,70	57.703,70	43.635,56	62.789,40	69,49%
Rio Uruguai	341,70	11.387,19	6.415,18	11.728,89	54,69%
Atlântico Sudeste	2.031,06	8.322,19	3.817,91	10.353,25	36,88%
TOTAL	43.618,03	202.622,64	107.420,86	246.240,67	43,62%

Fonte: Adaptado de ELETROBRAS, 2018b.

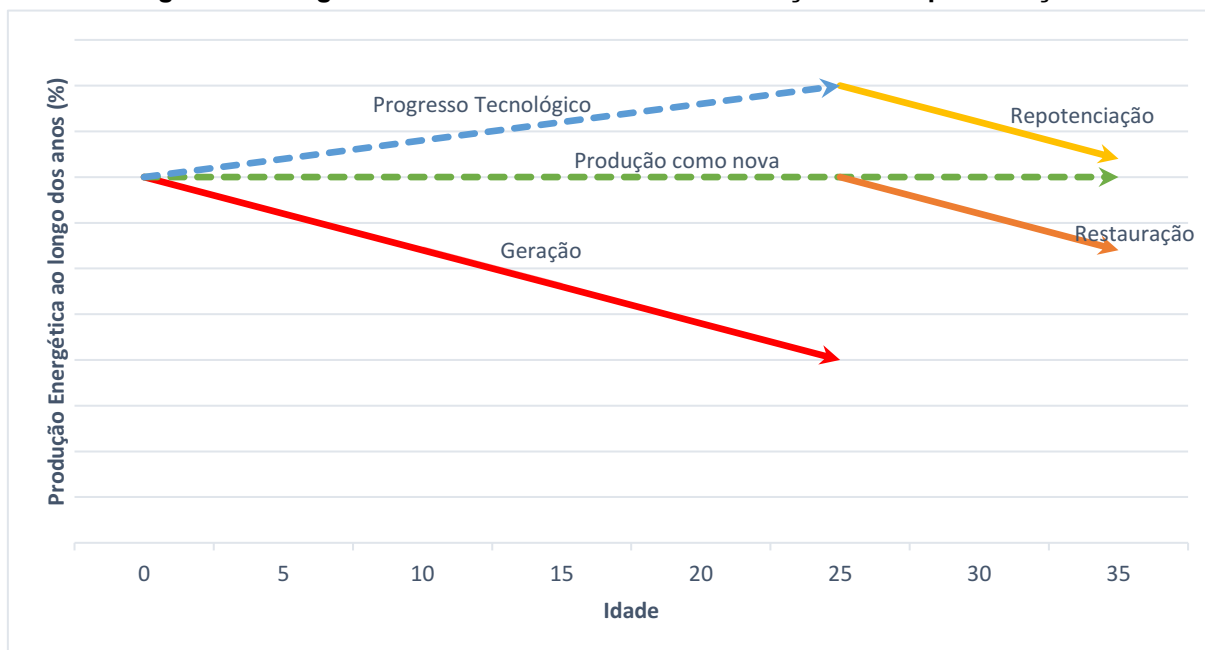
Notas: Total Estimado, Total Inventário, Capacidade Instalada e Total Geral em MW e Índice de Aproveitamento em percentual

Não existe uma lei ou decreto que limite o aproveitamento máximo hídrico das bacias nacionais. A LEI 9.433 de 8 de janeiro de 1997 institui a criação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, que é considerado como a lei base para a utilização das águas do país, seja para geração, irrigação ou até mesmo para captação de água e utilização da população.

Uma usina deve ser projetada para retirar o melhor aproveitamento do recurso hídrico, porém com o decorrer dos anos, os materiais utilizados para a geração de energia sofrem desgastes naturais de uso, provocando assim uma perda de eficiência na capacidade de geração. Para melhorar a eficiência pode-se restaurar as peças do conjunto original da turbina geradora ou realizar a substituição dos equipamentos por outros tecnologicamente inovados (EPE, 2019d).

A tecnologia está em constante evolução, principalmente referindo-se ao melhoramento da eficiência, pode-se aplicar essas melhorias nas usinas que tiveram sua eficiência reduzida pelo desgaste das máquinas e alcançado um melhoramento próximo do que foi projetado a usina, esse processo é conhecido como repotenciação da usina, ou seja, tem-se um aumento do rendimento. O efeito de desgaste natural, repotenciação e restauração da turbina podem ser visualizados na Figura 4, ilustrando graficamente que o efeito de troca dos equipamentos entrega uma eficiência superior do que a turbina-geradora original da usina, e ao fazer uma restauração na máquina pode-se alcançar no máximo a eficiência original de quando o equipamento era novo.

Figura 4 – Desgaste da turbina e efeitos de restauração e de repotenciação.



Fonte: Adaptado EPE, 2019d.

A Figura 4 mostra como a turbina hidráulica perde eficiência com os passar dos anos de utilização, isso é um processo comum em máquinas, não apenas com as turbinas hidráulicas. Ilustra ainda que ao alcançar 25 anos de utilização da máquina e hipótese de restaurar a turbina alcançando assim uma eficiência igual aquela que o equipamento foi projetado ou um processo de repotenciação na máquina para melhorar e assim obter uma eficiência superior da qual foi projetada.

2.3 Turbinas Hidráulicas

Estes elementos estão localizados na casa de força da usina, que é considerada como um equipamento fundamental para a geração de energia. O funcionamento da turbina se baseia na conversão de energias, ou seja, a água armazenada no reservatório cai por meio dos dutos e devido a gravidade e o desnível, ela possui energia potencial gravitacional armazenada, a água bate com toda essa energia acumulada na turbina e movimentada ela, fazendo então o seu papel de transformação da energia potencial gravitacional em energia cinética rotacional.

As turbinas possuem configurações e condições operacionais diferentes, e podem ser classificadas em: Turbinas de ação e Turbinas de reação. Segundo Fuchs,

Santos e Souza (1983) as turbinas de ação são aquelas que o rotor é recebido através da transformação de energia cinética da água que está escoando pelo conduto, já as turbinas de reação são aquelas que recebem energia rotacional através da transformação da energia cinética e da pressão da água em escoamento.

A eficiência das turbinas é essencial pois é a partir deste momento que começa a ter perdas nos sistemas eletromecânicos. As maiores causas para que a eficiência das turbinas fique entre 85 a 95% são as perdas mecânicas e hidráulicas (JÚNIOR, 2013).

2.3.1 Turbina Francis

A turbina Francis que até o ano de 2020 é a turbina hidráulica mais utilizada para a produção de energia elétrica no Brasil, teve sua criação em 1847 e recebeu esse nome em homenagem ao seu inventor que foi o engenheiro britânico-americano James Bicheno Francis (1815-1892). A turbina Francis sofreu mudanças no formato do rotor aos passar dos anos para o melhor aproveitamento da vazão e da queda que os rios apresentavam, por esse motivo que a turbina é muito versátil, podendo se adaptar conforme a necessidade para o melhor aproveitamento (DOS SANTOS, 2012). Na Figura 5, é apresentado alguns modelos de rotor que foram projetados para ter um aproveitamento melhor dos rios e reservatórios.

Figura 5 – Modelos de rotores da turbina Francis.



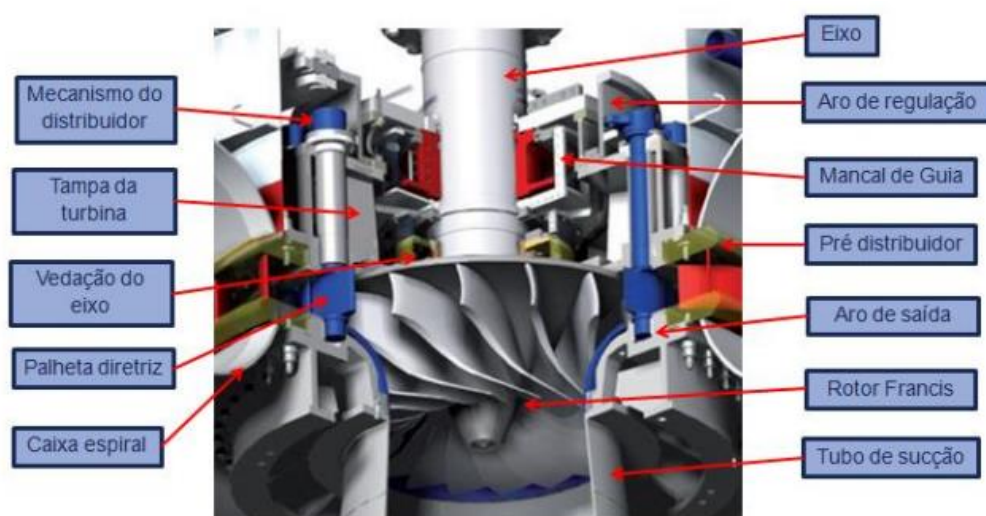
Fonte: Ministério de Minas e Energia, 2008.

Essa turbina é classificada como uma turbina de reação, onde a geração depende do fluxo de água e da pressão de operação da usina. Devido ao poder de modificar a turbina, é considerada muito versátil nas aplicações pois abrange desde

as pequenas usinas até as grandes, com potência nominal da turbina de até 820 MW, com variação de altura de 10 a 500 metros, com uma eficiência de até 94% (DE MORAIS, 2011).

Os componentes essenciais existentes nas turbinas Francis são: caixa espiral, distribuidor, pré-distribuidor, sistema de acionamento e controle do distribuidor, tubo de sucção, eixo, rotor Francis e mancais. Todos os elementos que compõe a turbina estão devidamente ilustrados na Figura 6.

Figura 6 – Principais elementos da turbina Francis.



Fonte: Tralli, 2018.

A caixa espiral tem por função a canalização da água que veio da tomada d'água através do conduto forçado, concentrando para que o pré-distribuidor atue e distribua uniformemente a força da água para o distribuidor. Esse tem por finalidade projetar a água no ângulo correto no rotor, o distribuidor é móvel e pode ser ajustado conforme a necessidade de cada usina para otimizar a produção de energia, ele é comandado pelo sistema de controle e acionamento que fica no lado de fora da turbina, podendo assim alterar conforme necessidade durante o processo de geração sem a necessidade de parar a turbina.

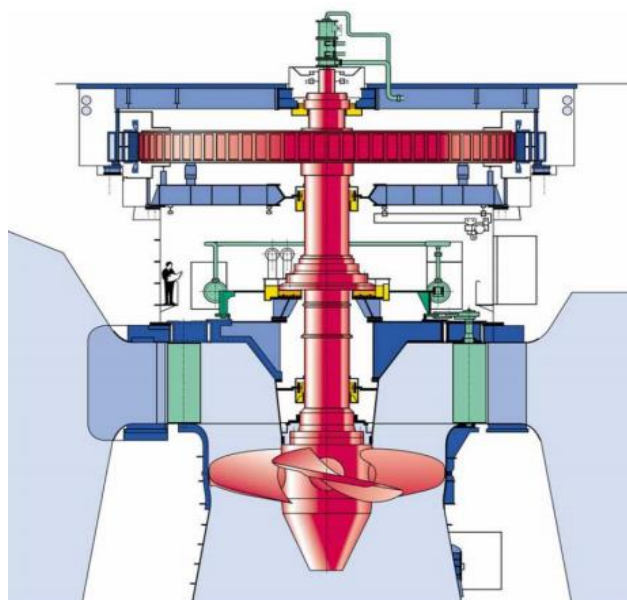
O rotor é o coração da turbina pois a água bate nele e faz com que rotacione o eixo do gerador, fazendo a conversão de energia potencial gravitacional em energia cinética rotacional. O tubo de sucção tem por finalidade a sucção da água da turbina para devolver ao leito do rio original.

2.3.2 Turbina Kaplan

Esta turbina foi criada em 1912 e recebeu esse nome em homenagem ao engenheiro austríaco Viktor Kaplan (1867-1934), que percebeu que a turbina Hélice tinha um problema físico para o melhor aproveitamento. A hélice da turbina era fixa, a faixa ideal de operação da turbina era difícil de ser alcançada. Após várias pesquisas descobriu que havia uma relação direta entre a potência obtida no processo, ângulo de abertura das palhetas do distribuidor e o rendimento, com isso, construiu a turbina Kaplan que possuía um dispositivo eletrônico para a regulação da hélice conforme a variação das palhetas (DOS SANTOS, 2013).

A maior vantagem da turbina Kaplan é a grande versatilidade e permite várias configurações diferentes, tem uma importância para as usinas com baixa queda de água (VINAGRE, BLANCO, *et al.*, 2016). A Figura 7 é uma representação de uma turbina Kaplan instalada na vertical.

Figura 7 – Representação da turbina modelo Kaplan.

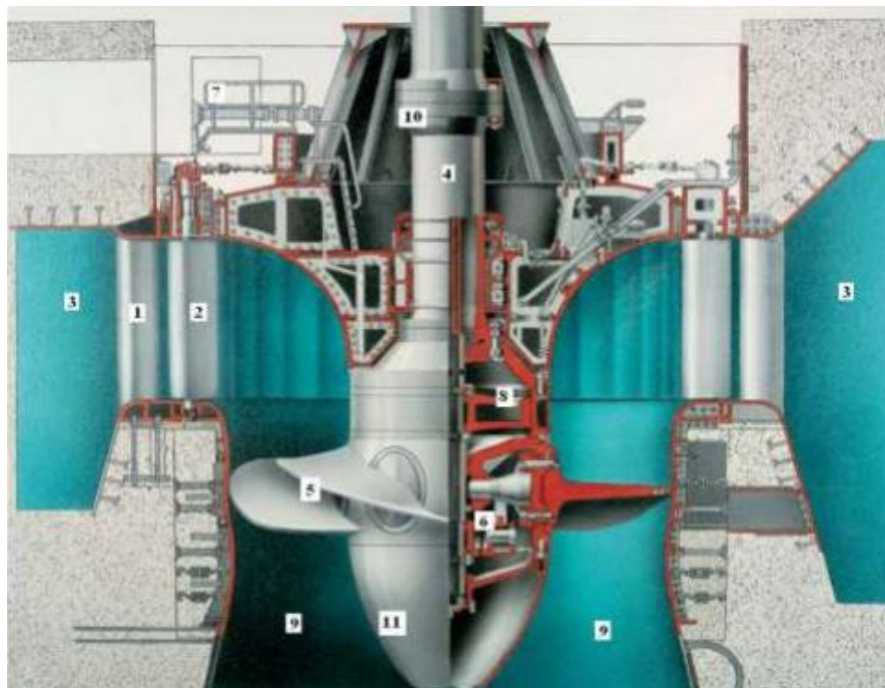


Fonte: Silva, 2007.

A turbina Kaplan está instalada na vertical, porém ela pode ser instalada na horizontal, pois em barragens com baixa queda de água não é possível instalar na vertical e esta turbina permite a instalação na horizontal. A turbina Kaplan tem como principal aplicação usinas com baixo desnível variando entre 6 a 70 metros, podendo

atingir uma eficiência de 94% e tendo como potência nominal da turbina de até 300 MW para a maior turbina existente (DIXON e HALL, 2014). Na Figura 8 está apresentado os elementos que compõe a turbina Kaplan.

Figura 8 – Detalhamento dos elementos da turbina Kaplan.



Fonte: Dos Santos, 2012.

Na Figura anterior é possível ver as 11 partes que compõem este modelo de turbina. O caminho da água começa passando pelo ponto 3 que é a caixa semi-espiral que encaminha para o ponto 1 que representa o distribuidor de pás fixas e em seguida passa para o ponto 2 que é o distribuidor de pás móveis onde controla a vazão de entrada da água, por ser móvel precisa ser comandada por um servo motor do distribuidor indicado pelo ponto 7. Após a água entrar pelo distribuidor, ela bate na hélice móvel indicada pelo ponto 5, que possui um mecanismo de mudança do ângulo de abertura das pás representado no ponto 6, neste momento a água já entregou a sua energia para a turbina e passa pelo ponto 9 que é a caixa de sucção para ser devolvida ao leito original do rio.

Na cabeça do rotor da turbina existe a ogiva indicada pelo ponto 11. O rotor está representado no ponto 4, dentro dele está o ponto 8 que é o servo motor de controle mesmo, e para conectar o rotor ao eixo do gerador tem-se a peça número 10 que é a flange de acoplamento, por onde será transmitido o torque gerado no rotor.

2.3.3 Turbina Pelton

Patenteada em 1880 pelo engenheiro norte-americano Lester Allen Pelton (1829-1908), um novo modelo de turbina hidráulica, onde a água entrava na turbina através de jatos direcionados para as conchas no rotor da turbina, diferente dos modelos anteriores apresentados, onde a vazão da turbina entrava em contato direto com o rotor. Para acionar o rotor, é direcionado um fluxo de água em direção as pás que possuem formato de conchas, essa injeção ocorre através de um ou mais injetores, para poder tirar o maior aproveitamento da energia contida na água (BÖHM, 2015).

Segundo Júnior (2013), este modelo de turbina possui uma regulação relativamente simples e de fácil fabricação e instalação, podendo ser utilizadas em usinas de grande potência, mas também podem ser utilizadas em usinas de baixa potência gerando dezenas de cv com uma baixa vazão e baixa queda de água. Na Figura 9 é apresentado uma turbina Pelton, contendo 5 bicos injetores de água na turbina.

Figura 9 – Turbina tipo Pelton instalada na usina.



Fonte: Dos Santos, 2012.

A Figura 9 apresenta uma turbina de grande potência, podendo ser analisada devido a quantidade de injetores de água na turbina, que nesse caso são 5. Segundo Dos Santos (2012) a quantidade de injetores nas turbinas Pelton pode variar de 1 a 6 injetores, a escolha da quantidade tem uma relação com o aproveitamento energético que queira se obter, em rios com maiores vazões costuma-se encontrar maior número de injetores, e com uma menor vazão é geralmente encontrado menor número de injetores.

Para Mello Jr. (2000), quando se deseja utilizar o potencial de geração para grandes desníveis é indicado o uso da turbina Pelton, podendo ser utilizada para alturas entre 150 até 2000 m. Ao abordar a eficiência da turbina, Junior, Oleskowicz e Lima (2011) destaca que o modelo construtivo da turbina e a condição de operação podem alterar sua eficiência, sendo o máximo rendimento próximo de 90%.

Um ponto de atenção segundo Böhm (2015) é a abrasividade que a água e as partículas suspensas provocam ao serem injetadas em direção as conchas do eixo do rotor com grande velocidade, efeito esse chamado de erosão.

Para Junior, Oleskowicz e Lima (2011) as principais partes que constituem a turbina do tipo Pelton podem ser divididas em 2 grupos, sendo eles: os elementos do distribuidor e os elementos da turbina geradora.

Os elementos que compõem o distribuidor são: a câmara de distribuição, o injetor e o regulador de velocidade. A câmara de distribuição é por onde a água entra quando sai do reservatório e está esperando ser injetada dentro da turbina, os injetores são as partes na qual irá injetar a água para dentro da turbina com grande velocidade, já o regulador de velocidade são dispositivos eletromecânicos que tem por função controlar a velocidade constante da turbina.

A turbina é o coração do conjunto gerador, dentro da turbina é possível identificar vários elementos, sendo eles: a roda motriz, as pás da turbina, a carcaça da turbina, a câmara de descarga, o sistema de frenagem hidráulica e o eixo. A carcaça da turbina é a própria casca, onde mantem todos os elementos dentro e sem deixar escapar a água, as pás da turbina é onde a água se choca quando é injetada para dentro da turbina, onde possui um formato de concha e fica preso na roda motriz, esta por sua vez tem a função de transferir a força motriz produzida nas pás para o eixo, o eixo vai transmitir toda a energia mecânica para um gerador que converterá a energia mecânica em energia elétrica. O sistema de descarga da água é o tubo de

descarga que tem por finalidade a retirada da água da turbina e devolver ao curso do rio, existe ainda um sistema de frenagem da turbina de forma hidráulica onde a água é injetada no sentido contrário da injeção tradicional para a geração de energia.

3 PROCESSO METODOLÓGICO

Nesta secção será abordado sobre a metodologia que será utilizada para realizar as análises de estudos sobre as influências da variação do ponto de tomada d'água e substituição de turbina para otimizar a capacidade de geração.

3.1 Tipo de Pesquisa

Essa pesquisa é do tipo descritivo-explicativo pois o trabalho contém conteúdo de caráter explicativo de forma a demonstrar os processos que acontecem e de realizar uma análise aos parâmetros e descrever formas diferentes de executar as ações. A abordagem será uma análise quantitativa, através de dados reais coletados de fonte secundária e aplicados nas equações de geração energética. Tem por natureza a pesquisa científica aplicada, que é a aplicação de conhecimentos científicos prévios em uma resolução de problema existente.

3.2 Métodos

Para dimensionar uma turbina hidráulica é necessário conhecer os dados de vazão do rio (Q [m^3/s]), a altitude no nível da jusante (H [m]) e a quebra bruta de desnível (H_L [m]). Os cálculos para o dimensionamento dos 3 modelos de turbinas foram retirados de Alexandre (2004). Para descobrir o trabalho específico (Y [J/Kg]) em qualquer modelo é a partir do desnível existente na construção da barragem (H) e a ação da gravidade ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$), mostrada na equação (1).

$$Y = g.H \quad (1)$$

Para o cálculo da rotação específica da turbina (n_{qA}), deve-se inicialmente saber uma rotação provisória que será calculada para encontrar a parte inteira de rotações da turbina. Para o cálculo desta rotação provisória existe uma diferenciação entre as turbinas, para os modelos Francis e Kaplan é obtido através da equação (2) e para o modelo Pelton da equação (3).

$$n_1 = 5,58 \cdot Y^{0,265} Q^{-0,5} \quad (2)$$

$$n_1 = 0,035 \cdot Y^{0,75} Q^{-0,5} \quad (3)$$

Com a rotação provisória encontrada será obtida número de pares de polos que existem dentro do alternador (z_p), dada pela equação (4).

$$z_p = 60/n_1 \quad (4)$$

Para o cálculo da rotação da turbina (n), que tem a relação entre a frequência nominal do Sistema Elétrico de Potência no qual a turbina será conectada e a parte inteira do número de pares de polos do alternador, dada pela equação (5).

$$n = \frac{60}{\text{parte inteira de } z_p} \quad (5)$$

Com o valor rotação que a turbina pode atingir, obtém-se qual a rotação específica na qual a turbina irá operar, apresentada na equação (6)

$$n_{qA} = 10^3 \cdot n \cdot \left[\frac{Q^{1/2}}{Y^{3/4}} \right] \quad (6)$$

É importante o conhecimento da rotação específica do rotor (n_{qAn}) na qual a água atingirá para produzir energia cinética. Essa informação só é aplicada nos modelos de turbina Francis e Kaplan e tem relação direta com a vazão do projeto. Para calcular a vazão de projeto do rotor tem-se as equações (7) e (8) que são para o modelo Francis e a equação (9) para o modelo Kaplan.

$$\text{Para } 60 \leq n_{qA} \leq 150 \quad Q_n = 0,8 \cdot Q \quad (7)$$

$$\text{Para } 150 \leq n_{qA} \leq 350 \quad Q_n = \frac{Q}{(1,415 - 0,11 \times 10^{-2} \cdot n_{qA})} \quad (8)$$

$$\text{Para } 300 \leq n_{qA} \leq 1000 \quad Q_n = (0,2 \times 10^{-3} \cdot n_{qA} + 0,8) \cdot Q \quad (9)$$

Com a vazão de projeto calculada, em uma equação única para ambos os modelos, descobrirá qual será a rotação específica do rotor que é dado pela equação (10).

$$n_{qAn} = 10^3 \cdot n \cdot \left[\frac{Q_n^{1/2}}{Y^{3/4}} \right] \quad (10)$$

O rendimento de uma turbina é muito importante para o melhor aproveitamento da energia que a água pode liberar. Para fazer a análise do quanto uma turbina aproveita do potencial hídrico existe um parâmetro chamado rendimento hidráulico (η_h). Fixa-se o valor de rendimento total (η_t) para o qual a turbina foi projetada e adota-se um rendimento mecânico (η_m) que pode ser variável de turbina para turbina. O rendimento mecânico para a turbina Francis varia entre $0,85 \leq \eta_m \leq 0,97$ e para os modelos de turbina Kaplan e Pelton varia $0,80 \leq \eta_m \leq 0,97$. Com esses 2 parâmetros definidos é possível verificar o rendimento hídrico que é dado pela equação (11).

$$\eta_h = \frac{\eta_t}{\eta_m} \quad (11)$$

Com o rendimento definido é possível calcular as potências hidráulica (P_h) e elétrica (P_e) no eixo da turbina. A fórmula da potência hidráulica é apresentada na equação (12) e da potência elétrica no eixo da turbina na equação (13).

$$P_h = Q \cdot Y \quad (12)$$

$$P_e = P_h \cdot \eta_t \quad (13)$$

3.3 Aplicação da Metodologia

A metodologia deste trabalho começa a ser aplicada através da coleta de dados construtivos e operacionais da barragem existente. Com os entendimentos da construção, pode-se realizar a análise da possibilidade de variação do ponto de tomada d'água e definido os pontos de estudo.

Os cálculos nos 5 pontos de tomada d'água escolhidos é realizado sobre apenas 1 modelo de turbina, que é a turbina Francis. Este procedimento serve para auxiliar para o entendimento da influência destes pontos para a capacidade de geração elétrica.

A segunda parte de estudo se baseia no entendimento de qual modelo de turbina pode-se obter uma otimização de capacidade de geração. Para que seja analisado, será escolhido um dos pontos de análise de tomada d'água e realizado os cálculos de acordo com a bibliografia.

Na realização destes procedimentos, será realizado a conclusão de qual modelo de turbina que será mais indicado para o padrão construtivos, podendo variar o ponto de tomada d'água e entendimento do impacto ambiental nesta usina hidrelétrica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados construtivos da barragem foram retirados em ITAIPU (2017), nos quais foram retirados o nível do reservatório, nível da turbina, nível e diâmetro da tomada d'água e vazão. Vale resaltar ainda que neste trabalho é analisada a variação do modelo de turbina hidráulica e o ponto de tomada d'água, as demais características construtivas desta barragem não serão alteradas.

- Cota do reservatório: 220
- Cota da turbina: 92
- Cota atual de tomada d'água: 186,62
- Diâmetro da tomada d'água: 32,5 m
- Vazão do conduto forçado: 690 m³/s

Foram definidos 5 pontos de tomada d'água diferentes para entendimento da sua influência na potência de geração da usina hidrelétrica. Para a definição destes 5 pontos foi definido que a cota atual será o ponto mais alto e através do raio da tomada d'água com a cota da turbina hidráulica foi identificado o ponto mais baixo na qual pudesse ser instalado. Os demais pontos foram escolhidos pela divisão igualitária de espaço entre o ponto mais alto e mais baixo possível de tomada d'água. As cotas definidas para análise estão apresentados a seguir:

- Ponto 1: Cota 186,62
- Ponto 2: Cota 167,02
- Ponto 3: Cota 147,43
- Ponto 4: Cota 127,84
- Ponto 5: Cota 108,25

4.1 Influência da Cota de Tomada D'Água

Para realização desta análise sobre o ponto de tomada d'água é realizado os cálculos de potência sobre o modelo Francis com todos os pontos definidos neste estudo, para que possa observar a relevância da variação sobre o mesmo modelo. Para os cálculos foi definido que a eficiência total (η_t) será de 0,95.

Com a execução dos cálculos apresentados no Apêndice A para cada novo ponto de tomada d'água proposto, os dados foram tabelados para verificar o que a influência desta mudança sobre a turbina Francis e apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados da Simulação das Cotas na Turbina Francis.

	Cota 186,62	Cota 167,02	Cota 147,43	Cota 127,84	Cota 108,25
Trabalho (J)	1255,68	1255,68	1255,68	1255,68	1255,68
Rotação Provisória (RPM)	1,407	1,407	1,407	1,407	1,407
Pares de Polos	42,64	42,64	42,64	42,64	42,64
Rotação (RPM)	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43
Rotação Específica (RPM)	177,90	177,90	177,90	177,90	177,90
Vazão da Turbina (m^3/s)	565,89	565,89	565,89	565,89	565,89
Rotação da Turbina (RPM)	161,11	161,11	161,11	161,11	161,11
Potência Hidráulica (KW)	866,42	866,42	866,42	866,42	866,42
Potência Elétrica (KW)	823,10	823,10	823,10	823,10	823,10

Fonte: Autoria Própria, 2022.

Os resultados das simulações de dados na turbina Francis, apresentados na Tabela 3, demonstram que a variação da cota de tomada d'água não variam os resultados obtidos para ponto. Neste trabalho se trás junto através da referência bibliográfica alguns cálculos para definição de dados construtivos do modelo da turbina, porém não tem como objetivos a análise destes dados para conclusões deste trabalho.

Através do entendimento dos cálculos, é possível compreender que o trabalho tem relação direta com a potência elétrica gerada, onde tem relação direta com o nível do reservatório através da queda bruta d'água, onde a variação do mesmo pode variar o resultado final de capacidade de potência elétrica de uma usina hidrelétrica, onde aumentando a queda bruta é possível ter um aumento na potência. Como o objetivo do presente trabalho não é variar o nível do reservatório, o resultado final da capacidade de geração permanece inalterada e constante.

Sobre o impacto ambiental causado pela implementação e operação da usina, o ponto de tomada d'água não afeta nos impactos ambientais ocasionados na implementação, estes impactos têm relação direta com a altura da barragem, ou seja, o ponto de tomada d'água pode estar na cota 108,25, mas se o nível do lago continuar

o mesmo, como proposto para este estudo, o nível de alagamento de terras continua na mesma proporção.

4.2 Turbina Hidráulica para Otimização da Capacidade de Geração

Este estudo além de verificação da influência da tomada d'água, também está analisando qual turbina hidráulica entre os 3 modelos seria o mais indicado para a otimização da capacidade de geração elétrica.

Para verificar qual turbina seria a mais indicada para a usina hidrelétrica de ITAIPU será realizado o cálculo para os modelos Kaplan, Francis e Pelton para a cota na qual hoje é a tomada d'água, ou seja, a cota 186,62. Para a realização dos cálculos, foram considerados para todos os modelos um rendimento total de 0,95.

Com a realização dos cálculos apresentados no Apêndice B, foram tabeladas as informações para melhor análise e entendimento dos dados e está disposto na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados da Simulação da Cota 186,62 nas 3 Turbinas.

	Turbina Francis	Turbina Kaplan	Turbina Pelton
Trabalho (J)	1255,68	1255,68	1255,68
Rotação Provisória (RPM)	1,407	1,407	0,281
Pares de Polos	42	42	213
Rotação (RPM)	1,43	1,43	0,282
Rotação Específica (RPM)	177,90	177,90	35,12
Vazão da Turbina (m^3/s)	565,89	576,55	-----
Rotação da Turbina (RPM)	161,11	162,78	-----
Potência Hidráulica (KW)	866,42	866,42	866,42
Potência Elétrica (KW)	823,10	823,10	823,10

Fonte: Autoria Própria, 2022.

Através dos dados finais, é possível verificar que todas as turbinas poderiam ser implementadas na usina hidrelétrica, uma vez que os equacionamentos de cada modelo proposto neste trabalho são similares. A capacidade de geração não tem relação direta com o modelo escolhido para implementar em projeto e sim com as características da turbina implementada. A variação da capacidade instalada pode

variar de acordo com o rendimento da turbina hidráulica, ou seja, para a definição do modelo deve-se verificar qual é o rendimento total do conjunto da turbina de acordo com o fabricante na qual será adquirida.

Para a questão de impactos ambientais envolvidas na usina hidrelétrica, os impactos causados na construção e operação de uma usina não tem relação direta com o ambiental, assim como o ponto de tomada d'água, os impactos como alagamento e devastação de terras variam de acordo com a altura da sua construção.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Nesta secção é apresentada as conclusões retiradas com a realização deste trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

5.1 Considerações Finais

Diante dos resultados obtidos no estudo de caso de mudança do ponto de tomada d'água, é possível entender que a capacidade de geração de energia elétrica está diretamente atrelada a queda bruta de água, sendo assim só poderia obter resultados diferentes do alcançado, caso fosse esse o ponto de estudo deste trabalho.

Para o caso do estudo de mudança de modelo de turbina hidráulica, vale ressaltar que todos os modelos tem cálculos similares para o quesito de capacidade de geração, sendo assim, a capacidade de geração não é alterada utilizando outros tipos de turbina, variando apenas as formulações de dimensionamento da turbina. Ainda é importante destacar que existem estudos onde demonstram que modelo é mais indicado para cada situação de vazão e queda bruta de água, esses estudos abordam o quesito das características construtivas das mesmas, como um exemplo o rendimento total que pode variar a capacidade de geração.

O projeto da usina hidrelétrica de ITAIPU foi realizado de forma a otimizar sua capacidade de geração de energia, quanto aos critérios tomada d'água e tipo de turbina. Neste estudo de caso não foram encontrados resultados que motivem variação nos pontos de análise, ou seja, não há como propor uma mudança dos pontos de estudo sem resultados significativos.

Não havendo proposta de substituição de turbina ou de tomada d'água, também não há como constatar redução nos impactos ambientais, o impacto causado em sua construção se deve pelo porte do lago de contenção.

5.2 Trabalhos Futuros

Com objetivo desenvolver esta área de estudo, deixa-se sugestão de trabalhos futuros:

- Pesquisa com fabricantes de turbinas hidráulicas para entendimento da definição do modelo Francis no projeto original.
- Estudo de viabilidade de aumento de vazão, para verificar se o rio comporta um aumento de vazão e como consequência aumento de capacidade de geração.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2019**. Agência Nacional de Águas - ANA. Brasília, p. 110. 2019.
- ALEXANDRE, D. B. **Desenvolvimento de Sistema Computacional para Pré-dimensionamento de Turbinas para Micro, Mini e Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Universidade Estadual Paulista. Botucatu, p. 109. 2004.
- BERMANN, C. Impasses e Controvérsias da Hidreletricidade. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 139-153, Janeiro/Abril 2007.
- BÖHM, R. **Projeto de uma Turbina Hidráulica Portátil**. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Panambi, p. 35. 2015.
- BRASIL. Lei n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**, Brasília, DF, 8 Janeiro 1997.
- CAUS, T. R.; MICHELS, A. **Energia Hidrelétrica: Eficiência na Geração**. Universidade Federal de Santa Maria. Camargo, p. 27. 2014.
- COLNAGO, G. R. **Contribuição para a Otimização de Turbinas em Usinas Hidrelétricas: Especificação e Operação**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, p. 142. 2011.
- DE MORAIS, E. J. P. **Modelo de Turbinas do Tipo Bulbo para Estudos de Estabilidade Eletromecânica de Sistemas Elétricos de Potência**. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, p. 221. 2011.
- DIXON, S. D.; HALL, C. **Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery**. 7^a. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014.
- DOS SANTOS, M. S. C. **Modelagem Dinâmica de Turbinas Hidráulicas Axiais de Dupla Regulagem para Estudos de Estabilidade Angular Transitória em sistemas Elétricos de Potência**. Universidade Federal de Itajuba. Itaubá, p. 192. 2012.
- DOS SANTOS, R. C. L. **Análise de Cavitação em uma Turbina Hidráulica do Tipo Kaplan**. Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 88. 2013.
- ELETOBRAS. Barragem de Hidrelétrica. **Centrais Elétricas Brasileiras**, 2017. Disponível em: <<https://eletrobras.com/pt/Paginas/Barragem-de-Hidreletrica.aspx>>. Acesso em: 06 Abril 2020.
- ELETOBRAS. Potencial Hidrelétrico Brasileiro em cada Estágio por Regiões. **Centrais Elétricas Brasileiras**, Dezembro 2018a. Disponível em: <<https://eletrobras.com/pt/AreasdeAtuacao/geracao/sipot/Potencial%20Hidrel%C3%>

A9trico%20Brasileiro%20por%20Regi%C3%A3o%20-%20Dezembro%202018.pdf>. Acesso em: 17 Setembro 2020.

ELETROBRAS. Potencial Hidrelétrico Brasileiro em cada Estágio por Bacia Hidrográfica. **Centrais Elétricas Brasileiras**, Dezembro 2018b. Disponível em: <<https://eletrobras.com/pt/AreasdeAtuacao/geracao/sipot/Potencial%20Hidrel%C3%A9trico%20Brasileiro%20por%20Bacias%20-%20Dezembro%202018.pdf>>. Acesso em: 16 Abril 2020.

EPE. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3ª. ed. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica. ANEEL, 2008.

EPE. Fontes de Energia. **Empresa de Pesquisa Energética. EPE**, 2017. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia>>. Acesso em: 30 março 2020.

EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2019**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética, 2019a.

EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2019**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética, 2019a.

EPE. **Balanço Energético Nacional 2019**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética, 2019b.

EPE. **Consumo anual de energia elétrica por classe: 1995 - 2018**. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília. 2019c.

EPE. **Repotenciação e Modernização de Usinas Hidrelétricas**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica. ANEEL, 2019d.

FUCHS, R. D.; SANTOS, A. H. M.; SOUZA, Z. D. **Centrais Hidro e Termelétricas**. São Paulo: Edgard Blucher, 1983.

GUERRA, S. M.; CARVALHO, A. V. D. Um paralelo entre os impactos das usinas hidrelétricas e termoelétricas. **Revista de Administração de Empresas**, São Paulo, v. 35, p. 83-90, Julho/Agosto 1995.

ITAIPU. Energia Hidráulica. **Itaipu Binacional**, 2010. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/energia/energia-hidraulica>>. Acesso em: 03 Abril 2020.

ITAIPU. **Usina Hidrelétrica de ITAIPU - Principais Características Técnicas**. ITAIPU Binacional. Foz do Iguaçu, p. 29. 2017.

JÚNIOR, A. M. et al. Vantagens e Desvantagens da Energia Hidráulica. **Acta Iguazu**, Cascavel, v. 2, n. 4, p. 20-28, 2013.

JUNIOR, A. S. M.; OLESKOWICZ, B. A.; LIMA, B. D. M. **Utilização de Controle Numérico Computadorizado para Fabricação de Turbinas Pelton de Baixa Potência**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR. Curitiba, p. 127. 2011.

JÚNIOR, R. L. S. **Projeto Conceitual de uma Turbina Hidráulica a ser Utilizada na Usina Hidrelétrica Externa de Henry Borden**. Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 83. 2013.

MACINTYRE, A. J. **Máquinas Motrizes Hidráulicas**. 1ª Edição. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983.

MELLO JR., A. G. D. **A Turbina de Fluxo Cruzado (Michell-Banki) como Opção para Centrâis Hidrelétricas de Pequeno Porte**. Universidade de São Paulo - USP. Campinas, p. 277. 2000.

MENDES, N. A. S. **As Usinas Hidrelétricas e seus Impactos: Os Aspectos Socioambientais e Econômicos do Reassentamento Rural de Rosana - Euclides da Cunha Paulista**. Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, p. 222. 2005.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Pequenos Aproveitamentos Hidrelétricos: Soluções Energéticas para a Amazônia**. Brasília: [s.n.], 2008.

MULLER, G. D. M. **Despacho de Máquinas e Geração de Usina Hidrelétrica Individualizada Utilizando Algoritmos Genéticos**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 168. 2010.

OLIVEIRA, B. A. D. **Conhecendo os Componentes de uma Usina Hidrelétrica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

QUEIROZ, R. D. et al. Geração de Energia Elétrica Através da Energia Hidráulica e seus Impactos Ambientais. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 13, p. 2774-2784, Agosto 2013.

ROSA, L. P. Geração Hidrelétrica, Termelétrica e Nuclear. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 39-58, Janeiro/Abril 2007.

SILVA, D. R. B. **Instrumentação de Turbina Hidráulica de Manutenção Centrada em Confiabilidade**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 229. 2007.

TOMAS, L. E. P. **Análise de Substituição da Turbina Instalada na Central Geradora Hidrelétrica Ivo Silveira**. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis, p. 55. 2018.

TRALLI, F. C. **Modelagem Dinâmica de Rotores de Unidades Hidrogeradoras**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 132. 2018.

VINAGRE, M. V. D. A. et al. Otimização do Uso de Turbinas Axiais em Pequenas Centrais Hidrelétricas da Amazônia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 88-98, Janeiro 2016.

APÊNDICE A - Simulação para Análise de Influência da Tomada D'Água

Para os cálculos abaixo é levado em consideração o ponto 1, localizado sobre a cota 186,62.

$$\begin{aligned}
 Y &= 9,81 * 128 = 1.255,68J \\
 n_1 &= 5,58 * 1255,68^{0,265} * 690^{-0,5} = 1,407 \text{ RPM} \\
 zp &= \frac{60}{1,407} = 42,64 \\
 n &= \frac{60}{42} = 1,43 \text{ RPM} \\
 n_{qA} &= 10^3 \cdot 1,43 \cdot \left[\frac{690^{1/2}}{1.255,68^{3/4}} \right] = 177,90 \text{ RPM} \\
 Q_n &= \frac{690}{(1,415 - 0,11 \times 10^{-2} \cdot 177,9)} = 565,89 \text{ m}^3/\text{s} \\
 n_{qAn} &= 10^3 \cdot 1,43 \cdot \left[\frac{565,89^{1/2}}{1.255,68^{3/4}} \right] = 161,11 \text{ RPM} \\
 P_h &= 690 * 1.255,68 = 866,42 \text{ KW} \\
 P_e &= 866,42 \times 10^3 * 0,95 = 823,1 \text{ KW}
 \end{aligned}$$

Neste momento os cálculos abaixo levam em consideração o ponto 2, localizado sobre a cota 167,62.

$$\begin{aligned}
 Y &= 9,81 * 128 = 1.255,68J \\
 n_1 &= 5,58 * 1255,68^{0,265} * 690^{-0,5} = 1,407 \text{ RPM} \\
 zp &= \frac{60}{1,407} = 42,64 \\
 n &= \frac{60}{42} = 1,43 \text{ RPM} \\
 n_{qA} &= 10^3 \cdot 1,43 \cdot \left[\frac{690^{1/2}}{1.255,68^{3/4}} \right] = 177,90 \text{ RPM} \\
 Q_n &= \frac{690}{(1,415 - 0,11 \times 10^{-2} \cdot 177,9)} = 565,89 \text{ m}^3/\text{s} \\
 n_{qAn} &= 10^3 \cdot 1,43 \cdot \left[\frac{565,89^{1/2}}{1.255,68^{3/4}} \right] = 161,11 \text{ RPM} \\
 P_h &= 690 * 1.255,68 = 866,42 \text{ KW} \\
 P_e &= 866,42 \times 10^3 * 0,95 = 823,1 \text{ KW}
 \end{aligned}$$

Os cálculos a seguir levam em consideração o ponto 3, localizado sobre a cota 147,43.

$$Y = 9,81 * 128 = 1.255,68J$$

$$n_1 = 5,58 * 1255,68^{0,265} * 690^{-0,5} = 1,407 \text{ RPM}$$

$$zp = \frac{60}{1,407} = 42,64$$

$$n = \frac{60}{42} = 1,43 \text{ RPM}$$

$$n_{qA} = 10^3 \cdot 1,43 \cdot \left[\frac{690^{1/2}}{1.255,68^{3/4}} \right] = 177,90 \text{ RPM}$$

$$Q_n = \frac{690}{(1,415 - 0,11 \times 10^{-2} \cdot 177,9)} = 565,89 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$n_{qAn} = 10^3 \cdot 1,43 \cdot \left[\frac{565,89^{1/2}}{1.255,68^{3/4}} \right] = 161,11 \text{ RPM}$$

$$P_h = 690 * 1.255,68 = 866,42 \text{ KW}$$

$$P_e = 866,42 \times 10^3 * 0,95 = 823,1 \text{ KW}$$

Para entendimento dos dados para o ponto 4, localizado na cota 127,84, foram realizados os cálculos a seguir.

$$Y = 9,81 * 128 = 1.255,68 \text{ J}$$

$$n_1 = 5,58 * 1255,68^{0,265} * 690^{-0,5} = 1,407 \text{ RPM}$$

$$zp = \frac{60}{1,407} = 42,64$$

$$n = \frac{60}{42} = 1,43 \text{ RPM}$$

$$n_{qA} = 10^3 \cdot 1,43 \cdot \left[\frac{690^{1/2}}{1.255,68^{3/4}} \right] = 177,90 \text{ RPM}$$

$$Q_n = \frac{690}{(1,415 - 0,11 \times 10^{-2} \cdot 177,9)} = 565,89 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$n_{qAn} = 10^3 \cdot 1,43 \cdot \left[\frac{565,89^{1/2}}{1.255,68^{3/4}} \right] = 161,11 \text{ RPM}$$

$$P_h = 690 * 1.255,68 = 866,42 \text{ KW}$$

$$P_e = 866,42 \times 10^3 * 0,95 = 823,1 \text{ KW}$$

Os cálculos a seguir levam em consideração o ponto 5, localizado sobre a cota 108,25.

$$Y = 9,81 * 128 = 1.255,68 \text{ J}$$

$$n_1 = 5,58 * 1255,68^{0,265} * 690^{-0,5} = 1,407 \text{ RPM}$$

$$zp = \frac{60}{1,407} = 42,64$$

$$n = \frac{60}{42} = 1,43 \text{ RPM}$$

$$n_{qA} = 10^3 \cdot 1,43 \cdot \left[\frac{690^{1/2}}{1.255,68^{3/4}} \right] = 177,90 \text{ RPM}$$

$$Q_n = \frac{690}{(1,415 - 0,11 \times 10^{-2} \cdot 177,9)} = 565,89 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$n_{qAn} = 10^3 \cdot 1,43 \cdot \left[\frac{565,89^{1/2}}{1.255,68^{3/4}} \right] = 161,11 \text{ RPM}$$

$$P_h = 690 \cdot 1.255,68 = 866,42 \text{ KW}$$

$$P_e = 866,42 \times 10^3 \cdot 0,95 = 823,1 \text{ KW}$$

APÊNDICE B - Simulação para Análise da Turbina Hidráulica

Para os cálculos abaixo é levado em consideração a cota 186,62, nas equações da turbina Francis.

$$\begin{aligned}
 Y &= 9,81 * 128 = 1.255,68J \\
 n_1 &= 5,58 * 1255,68^{0,265} * 690^{-0,5} = 1,407 \text{ RPM} \\
 zp &= \frac{60}{1,407} = 42,64 \\
 n &= \frac{60}{42} = 1,43 \text{ RPM} \\
 n_{qA} &= 10^3 * 1,43 * \left[\frac{690^{1/2}}{1.255,68^{3/4}} \right] = 177,90 \text{ RPM} \\
 Q_n &= \frac{690}{(1,415 - 0,11x10^{-2} * 177,9)} = 565,89 \text{ m}^3/s \\
 n_{qAn} &= 10^3 * 1,43 * \left[\frac{565,89^{1/2}}{1.255,68^{3/4}} \right] = 161,11 \text{ RPM} \\
 P_h &= 690 * 1.255,68 = 866,42 \text{ KW} \\
 P_e &= 866.42x10^3 * 0,95 = 823,1KW
 \end{aligned}$$

A simulação dos dados para a turbina hidráulica do modelo Kaplan, para a cota 186,62 está descrito abaixo:

$$\begin{aligned}
 Y &= 9,81 * 128 = 1.255,68J \\
 n_1 &= 5,58 * 1255,68^{0,265} * 690^{-0,5} = 1,407 \text{ RPM} \\
 zp &= \frac{60}{1,407} = 42,64 \\
 n &= \frac{60}{42} = 1,43 \text{ RPM} \\
 n_{qA} &= 10^3 * 1,43 * \left[\frac{690^{1/2}}{1.255,68^{3/4}} \right] = 177,90 \text{ RPM} \\
 Q_n &= (0,2x10^{-3} * 177,90 + 0,8) * 690 = 576,55 \text{ m}^3/s \\
 n_{qAn} &= 10^3 * 1,43 * \left[\frac{576,55^{1/2}}{1.255,68^{3/4}} \right] = 162,78 \text{ RPM} \\
 P_h &= 690 * 1.255,68 = 866,42 \text{ KW} \\
 P_e &= 866.42x10^3 * 0,95 = 823,1KW
 \end{aligned}$$

Para o modelo Pelton, os cálculos foram realizados segunda a metodologia, para a cota 186,62.

$$\begin{aligned}
 Y &= 9,81 * 128 = 1.255,68J \\
 n_1 &= 0,035 * 1255,68^{0,75} * 690^{-0,5} = 0,281 \text{ RPM}
 \end{aligned}$$

$$zp = \frac{60}{0,281} = 213,52$$

$$n = \frac{60}{213} = 0,282 \text{ RPM}$$

$$n_{qA} = 10^3 \cdot 0,282 \cdot \left[\frac{690^{1/2}}{1.255,68^{3/4}} \right] = 35,12 \text{ RPM}$$

$$P_h = 690 * 1.255,68 = 866,42 \text{ KW}$$

$$P_e = 866.42 \times 10^3 * 0,95 = 823,1 \text{ KW}$$