



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO AMAZONAS

CAMPUS MANAUS-CENTRO

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS

BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MATHEUS BEN-HUR RAMIREZ SAPUCAIA

ESTUDO DE VIABILIDADE PARA IMPLANTAÇÃO DE TURBINAS BULBO NA
MICRORREGIÃO DO RIO MADEIRA

MANAUS

2020

MATHEUS BEN-HUR RAMIREZ SAPUCAIA

ESTUDO DE VIABILIDADE PARA IMPLANTAÇÃO DE TURBINAS BULBO NA
MICRORREGIÃO DO RIO MADEIRA

Projeto de pesquisa TCC apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, Campus Manaus-Centro, locado no Departamento Acadêmico de Processos Industriais, como requisito parcial para aprovação na disciplina de TCC e obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador Prof. Dr. José Josimar Soares

Coorientador Prof. Esp. Cláudio Tavares Pessoa

MANAUS

2020

MATHEUS BEN-HUR RAMIREZ SAPUCAIA

**ESTUDO DE VIABILIDADE PARA IMPLANTAÇÃO DE TURBINAS BULBO NA
MICRORREGIÃO DO RIO MADEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal
de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas,
como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em __01__/_10__/_2020__

BANCA EXAMINADORA

(Assinado digitalmente em 05/05/2021 19:51)

JOSE JOSIMAR SOARES
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
Matrícula: 1961168

(Assinado digitalmente em 05/05/2021 20:57)

JOAO NERY RODRIGUES FILHO
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
Matrícula: 267939

(Assinado digitalmente em 05/05/2021 20:27)

SIDNEY ASSIS CHAGAS
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
Matrícula: 1015898

Biblioteca do IFAM- Campus Manaus Centro

S241e Sapucaia, Matheus Ben-Hur Ramirez.
Estudo de viabilidade para implantação de turbinas bulbo na microrregião do rio madeira / Matheus Ben-Hur Ramirez Sapucaia. – Manaus, 2021.
56 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, *Campus Manaus Centro*, 2021.

Orientador: Prof. Dr. José Josimar Soares.

Coorientador: Prof. Esp. Cláudio Tavares Pessoa

1. Engenharia mecânica. 2. Energia sustentável – Amazônia.. 3. PCH. 4. Turbinas. 5. Bulbo. I. Soares, José Josimar. (Orient.) II. Pessoa, Cláudio Tavares. (Coorient.) II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas III. Título.

CDD 621

À população Amazonense, que essa pequena contribuição possa instigar futuros trabalhos na área de geração de energia e colaborar para o acesso cada vez maior das comunidades a energias limpas, renováveis e não agressivas ao meio ambiente.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por tornar tudo isso possível.

Ao IFAM, meus sinceros agradecimentos por abrir tantas oportunidades para meu desenvolvimento pessoal, profissional e científico. Foram 5 anos fornecendo apoio, estrutura e educação de qualidade. O débito é eterno e os laços inseparáveis.

Aos professores, posso dizer que tive grandes ensinamentos e todos contribuíram de alguma forma para o meu crescimento. O sentimento de agradecimento se estende a todos, em especial: Prof. José Francisco de Caldas Costa, Prof. Carlos Alberto Monteiro de Oliveira, Prof. João Nery Rodrigues Filho, Prof. José Josimar Soares e Prof. Sidney Assis Chagas.

Aos servidores do IFAM, deixo meu muito obrigado pela ajuda, disponibilidade de tempo e paciência. Em especial as servidoras do DAPI: Tayna Duarte e Patrícia Veras.

Aos meus familiares e amigos, obrigado pelo incentivo, apoio e compreensão por todos esses anos de ausência para me dedicar aos estudos. Em especial aos meus pais e avós.

RESUMO

O Amazonas é o maior estado do Brasil, com matas densas e grandes rios volumosos, os 62 municípios espalhados por suas terras sofrem com esse custo amazônico que são grandes problemas de logística e de investimento devido à grande área territorial da região. Atender a essa população com recursos básicos e energia elétrica é desafiador, pois inviabiliza até a passagem do Sistema Interligado Nacional (SIN) para atravessar a Amazônia e atender esses municípios. O estado conta com diversos sistemas isolados e termoelétricos para atender as comunidades, mesmo a região possuindo os maiores recursos hídricos do País para geração hidrelétrica, e é na Floresta Amazônica que se concentra a maior quantidade de usinas termelétricas a diesel e gás natural, prejudicando a sustentabilidade da região com a ausência de recursos renováveis. Este trabalho analisará os dados da microrregião do Rio Madeira localizada no estado do Amazonas e a possibilidade de instalação de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) com turbinas hidráulicas do tipo Bulbo para atender aqueles municípios. A metodologia adotada é caracterizada como pesquisa bibliográfica, de caráter descritivo e analisando dados fornecidos pelas agências nacionais reguladoras de energia, buscando atender a demanda energética da população de forma sustentável. Desta forma, analisou-se quais seriam as regiões beneficiadas, a demanda que precisaria ser atendida para aqueles municípios e o ganho positivo que se pode obter utilizar a tecnologia das PCH tipo bulbo, deixando de lado modelos não renováveis ou que causam grande impacto ambiental como as grandes Usinas Hidrelétricas (UHE) que estão sendo construídas. Os resultados mostram que há possibilidade de implantação de grandes UHE, porém na busca por condições mais sustentáveis e de menor impacto para a região, a utilização de turbinas bulbo em PCH se torna mais viável e com menores impactos.

Palavras-Chave: PCH; Turbinas; Bulbo; Amazônia.

ABSTRACT

Amazonas is the largest state in Brazil, with dense forests and large voluminous rivers, the 62 municipalities spread over its lands suffer from this Amazonian cost, which are major logistical and investment problems due to the large territorial area of the region. Serving this population with basic resources and electricity is challenging, as it makes the National Interconnected System (SIN) unfeasible to cross the Amazon and serve these municipalities. The state has several isolated and thermoelectric systems to serve the communities, even though the region has the largest water resources in the country for hydroelectric generation, and it is in the Amazon Forest that the largest quantity of diesel and natural gas thermoelectric plants is concentrated, damaging the sustainability of the region with the absence of renewable resources. This work will analyze the data of the micro-region of the Madeira River located in the state of Amazonas and the possibility of installing Small Hydroelectric Power Plants (SHPP) with Bulb type hydraulic turbines to serve those municipalities. The adopted methodology is characterized as bibliographic research, of a descriptive character and analyzing data provided by the national energy regulatory agencies, seeking to meet the population's energy demand in a sustainable manner. In this way, it was analyzed which regions would benefit, the demand that would need to be met for those municipalities and the positive gain that can be obtained using the technology of bulb type SHPPs, leaving aside non-renewable models or that cause great environmental impact such as the large Hydroelectric Power Plants (HEP) that are being built. The results show that there is a possibility of implantation of large HEP, however in the research for more sustainable conditions and of less impact for the region, the use of bulb turbines in SHPP becomes more viable and with less impacts.

Key words: SHP; Turbines; Bulb; Amazon.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa das Microrregiões do Amazonas.....	23
Figura 2 – Mapa das Vias de Transporte do Amazonas.....	24
Figura 3 – UTE Mauá 3 em Manaus	27
Figura 4 – Esquema de Usina Hidrelétrica.....	28
Figura 5 - PCH Cristina – Rio Lambari Cristina - MG.....	31
Figura 6 - Desenho Artístico de Turbina Pelton.....	33
Figura 7 – Ilustração de Burbina Francis.	35
Figura 8 – Ilustração Turbina Kaplan.....	36
Figura 9 – Vista em Corte de uma Turbina Bulbo	38
Figura 10 – Mapa Dinâmico de Sistemas Isolados	40
Figura 11 – Ilustração do Sistema para Acúmulo de Água das Hidrelétricas	42
Figura 12 – Meandros entre os Municípios de Manicoré e Humaitá.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Potencial Hidroelétrico Brasileiro (valor em MW).....	19
Tabela 2 – Classificação de Centrais Hidrelétrica por Potência.....	29
Tabela 3 – Classificação de Centrais Hidrelétrica pela altura de queda d'água.....	30
Tabela 4 – Consumo Médio Total por Subsistema, Região e UF Norte (kWh/mês)	41
Tabela 5 – Comparativo das Usinas Implantadas na Bacia Hidrográfica do AM.....	43
Tabela 6 – Definição de Instalação para cada Município.....	49
Tabela 7 – Características dos Reservatórios.....	51

Lista de Gráficos

Gráfico1 – Brasil no Cenário Mundial de Geração de Energia.....	18
Gráfico 2 – Matrizes Energéticas Brasileiras	18
Gráfico3 – Consumo de Energia Elétrica na Capital do Amazonas.....	22
Gráfico 4 – Estrutura de Consumo no Interior do Amazonas	25
Gráfico5 – Campo de Aplicação Típico das Principais Turbinas Hidráulicas.....	48
Gráfico 6 – Rendimento com Diferentes Tipos de Turbinas e Variação de Vazão	49
Gráfico 7 – Custos de Produção de Energia Elétrica no Brasil	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

SIN – Sistema Interligado Nacional
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
PCH – Pequena Central Hidrelétrica
UHE – Usina Hidrelétrica
SIPOT – Potencial Hidrelétrico Brasileiro
PIM – Polo Industrial de Manaus
UTE – Usina Termelétrica
LT – Linha de Transmissão
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MME – Ministério de Minas e Energia
IPAAM – Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas
CH – Central Hidrelétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
----------	------------------------	-----------

2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1	CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS DO BRASIL.....	16
2.1.1	Matriz Energética Brasileira.....	16
2.1.2	Potencial Hidroelétrico Brasileiro.....	18
2.2	MANAUS E O POLO INDUSTRIAL.....	20
2.3	MICRORREGIÕES DO AMAZONAS.....	22
2.3.1	Mesorregião Sul.....	24
2.3.1.1	<i>Microrregião do Madeira.....</i>	<i>24</i>
2.4	TERMELÉTRICA.....	26
2.5	HIDRELÉTRICA.....	28
2.5.1	Tipos de Usinas Hidrelétricas.....	28
2.5.2	Pequena Central Hidrelétrica.....	30
2.6	TURBINAS HIDRÁULICAS.....	310
2.6.1	Classificação das Turbinas Hidráulicas.....	31
2.6.2	Turbina Pelton.....	32
2.6.3	Turbina Francis.....	33
2.6.4	Turbina Kaplan.....	34
2.6.5	Turbina Bulbo.....	35
3	METODOLOGIA.....	38
3.1	LEVANTAMENTO POPULACIONAL DA REGIÃO.....	40
3.2	HIDRELÉTRICA DE SANTO ANTÔNIO E JIRAU.....	41

3.3	IMPACTOS AMBIENTAIS E SUSTENTABILIDADE.....	42
3.4	EXPRESSÃO MATEMÁTICA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA.....	43
3.5	SELEÇÃO DO TIPO DE TURBINA.....	47
3.6	RENDIMENTO DA TURBINA.....	48
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO.....	49
4.1	ENERGIA PRODUZIDA.....	50
4.2	DESENVOLVIMENTO PARA A REGIÃO.....	53
4.3	ENERGIA LIMPA E SUSTENTÁVEL.....	53
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	54
	REFERÊNCIAS.....	55

1. INTRODUÇÃO

Devido à grande extensão do estado do Amazonas e limitações geográficas para a geração de energia, os municípios têm dificuldade em suprir sua demanda energética que cresce a cada ano. Da mesma forma, o estado é beneficiado por um grande número de rios volumosos e seus afluentes que o banham por toda sua extensão, o qual a maior parte do potencial desses rios não é utilizado. As Centrais Hidrelétrica (CH) são basicamente usinas que utilizam de recursos hídricos para gerar grandes quantidade de energia elétrica, limpa e renovável. Dentro deste conceito, há diferentes modelos de turbinas hidráulicas que são instaladas nas CH, as quais variam no rendimento de geração, no tamanho do seu reservatório e instalações que podem ser aplicadas.

Assim, o presente trabalho baseia-se em um levantamento de dados acerca das características da microrregião do Rio Madeira, suas atuais fontes geradoras e a capacidade de implantação de um modelo de geração hídrica. Levando em consideração as características geográficas e sustentáveis para a comunidade, possibilitando suprir a demanda energética. Em busca de atender a essas características, dentre os vários modelos de geração de energia disponíveis atualmente, qual seria o modelo hidroelétrico que melhor se adequa à realidade da região do Rio Madeira?

Devido ao grande número de instalações hidrelétricas espalhadas pelo País, sendo um dos maiores geradores de energia por fonte hídrica do mundo, o Brasil detém grande conhecimento nesse seguimento de produção de energia. Para ocorrer os investimentos nesses pequenos municípios amazonenses, haveria maior facilidade de aplicação por se tratar de uma tecnologia bastante conhecida e utilizada, além de proporcionar outras possibilidades de geração, devido ao uso quase exclusivo de termelétricas no interior do Amazonas. A região norte possui um enorme volume de rios, a instalação de centrais hidrelétricas, pode trazer ganhos de energia proporcionalmente altos e atingindo comunidades mais afastadas dos grandes centros urbanos, melhorando a qualidade de vida e sustentabilidade de uma região que atualmente, depende da geração de fontes de matéria-prima fóssil e do Sistema Interligado Nacional (SIN).

A justificativa para a realização desse trabalho parte do pressuposto que a matriz energética do estado do Amazonas, em sua maioria, fontes térmicas e carece de alternativas para

fornecer energia. Buscando uma solução para aumentar a geração de energias limpas e renováveis na região, o trabalho visará determinar a viabilidade da implantação de um sistema de geração de energia hídrica, assim como seu dimensionamento, delimitação de turbina, modelo, viabilidade econômico-ambiental na utilização de um sistema renovável, ao invés de um sistema de origem fóssil que é comumente utilizado. Tendo como referencial teórico grandes autores e pesquisadores na área de geração de energia, como: Lineu e Carvalho, o trabalho defende a utilização de turbinas bulbo para a instalação de Pequenas Centrais Hidrelétricas na Região do Rio Madeira para atender a cinco municípios que fazem parte da microrregião.

Este trabalho tem como objetivo, propor um modelo de central hidrelétrica por meio de turbinas bulbo, verificando sua viabilidade de implantação para a microrregião do Rio Madeira, localizada no Amazonas. Os dados serão baseados nas características da microrregião levando em conta o rendimento da usina, possibilidade de área alagada, dimensionamento e sustentabilidade. Desse objetivo decorrem outros três específicos, quais sejam:

- a) Comparar os dados de geração entre as fontes de energia utilizadas atualmente e a PCH por meio de uma turbina bulbo;
- b) Analisar a viabilidade de implantação, sustentabilidade e ganho da utilização de uma fonte de energia renovável;
- c) Apresentar possibilidades de estudos futuros para as demais regiões e instalações híbridas;

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este referencial teórico acompanhará a ideia de autores renomados, dentro da área de máquinas de fluxo, analisando dados acerca dos modelos hidrelétricos, centrais de pequeno e grande porte, assim como a definição dos tipos de turbinas hidráulicas, em específico da turbina tipo Bulbo. Tendo em vista a finalidade de obter material bibliográfico suficiente para embasar e validar os resultados a serem encontrados, os quais poderão viabilizar ou não a instalação de Pequenas Centrais Hidrelétricas na microrregião do Rio Madeira.

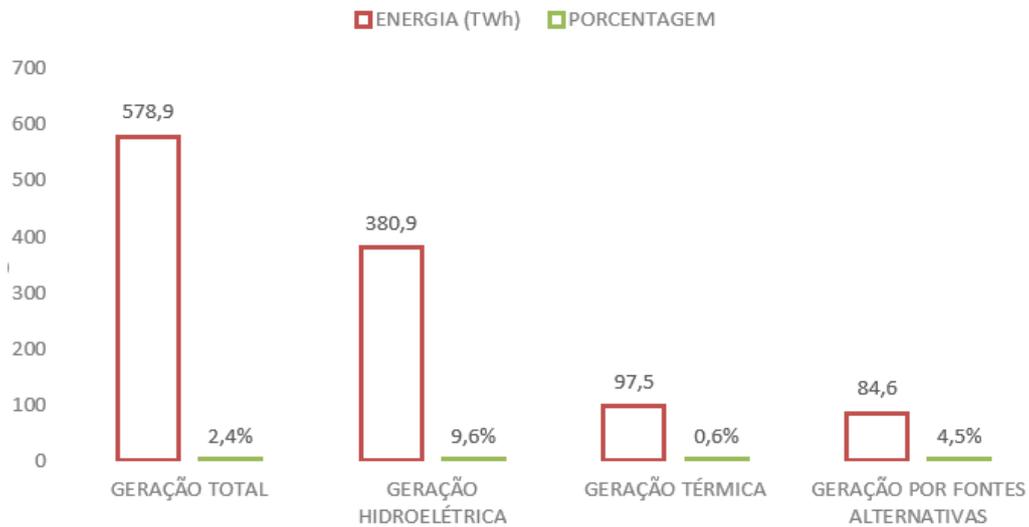
2.1 CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS DO BRASIL

O Brasil é o 5º maior do país do mundo com uma área de 8 515 767 quilômetros quadrados (km²) e o maior da América do Sul. Grande parte de seu território encontra-se na linha do equador ou trópico de capricórnio, fornecendo grande quantidade de incidência solar durante o ano. Possui uma enorme costa litorânea que se estende de norte a sul com 7 491 quilômetros de extensão voltados ao Oceano Atlântico, além de reservas abundantes de água doce, o qual detém o maior aquífero do mundo e um dos maiores rios em extensão e volume. (IBGE, 2020)

2.1.1 Matriz Energética Brasileira

O Brasil é uma das grandes potências em geração de energia, como pode ser visto na Gráfico 1, há uma porcentagem de participação do país em todas as principais matrizes do mundo, principalmente nas fontes limpas e renováveis. Segundo o anuário estatístico de energia elétrica de 2019, em geração total de energia o país está na oitava colocação, em geração hidrelétrica, localiza-se na terceira posição e em fontes alternativas, como eólica e energia solar, destaca-se na sexta posição. A geração de energia baseada em fontes térmicas ainda é muito presente no Brasil, mas vem deixando de ser utilizada com o passar dos anos, no cenário mundial o país já chega a vigésima quinta posição, mostrando que as fontes térmicas, que tem uma grande influência no aquecimento global e mudanças climáticas, estão perdendo espaço no sistema de abastecimento energético brasileiro.

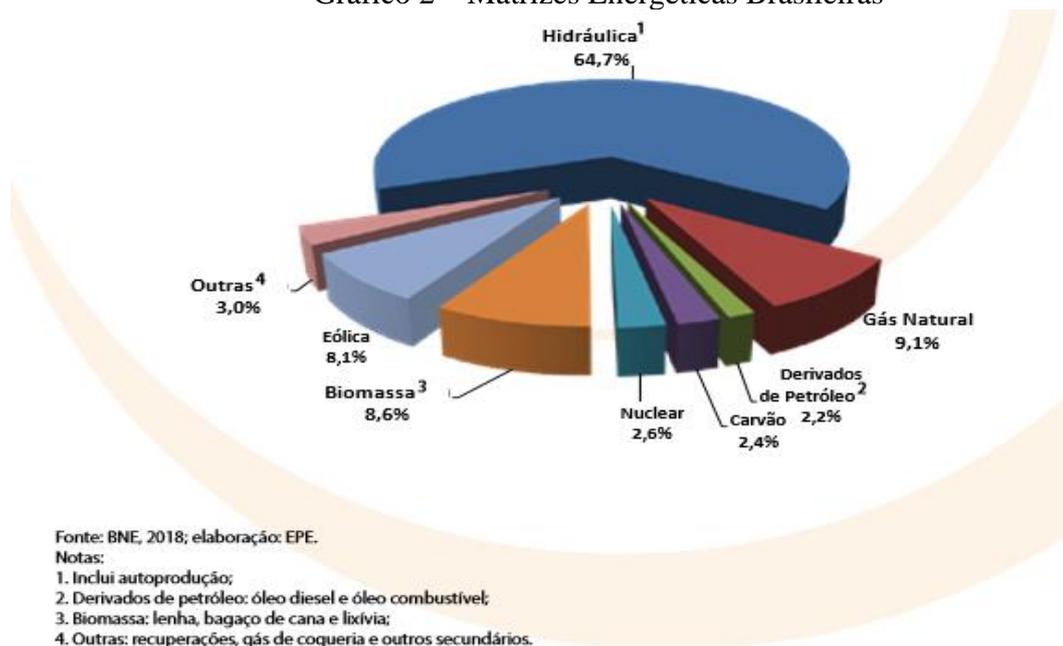
Gráfico1 – Brasil no Cenário Mundial de Geração de Energia



Fonte: Próprio Autor (2020)

Segundo o Governo Federal, as fontes de energias renováveis já representam 83% da matriz elétrica brasileira, mostrando o avanço do país na geração de uma energia limpa e sustentável e o que levará a ser, possivelmente, o primeiro país totalmente movido a fontes de energias renováveis.

Gráfico 2 – Matrizes Energéticas Brasileiras



Fonte: EPE (2019)

Assim como mostra o gráfico 2, o Brasil tem uma grande diversidade de fontes de energia, devido ao seu grande território, diferentes regiões e recursos naturais. Sua principal fonte de geração é a hídrica, com mais de 60% de sua energia total sendo gerada por Hidrelétricas de Norte a Sul do país, que garantem segurança energética contínua, renovável e em grandes proporções. Devido ao grande litoral que o país possui, matrizes baseadas em energia solar e eólica também vêm sendo instaladas, mostrando um grande desempenho e já ultrapassando os 8% da energia do país. O biogás e a biomassa também começaram a ganhar espaço na matriz brasileira de geração de energia, já representando participação maior que a energia eólica e solar, além de ser dois grandes substitutos do gás natural, e estarem ganhando cada vez mais espaço.

2.1.2 Potencial Hidroelétrico Brasileiro

O Brasil tem um potencial extremamente grande para instalação de grandes usinas hidrelétrica devido a quantidade de rios volumosos que banham o país, como pode ser visto pela Tabela 1 abaixo, boa parte desse recurso ainda não foi aproveitado, principalmente nos estados localizados na região Norte do país onde existe a maior bacia hidrográfica, assim como diversos rios que abrangem toda a região.

Tabela 1 – Potencial Hidroelétrico Brasileiro (valor em MW)

UF	Total Estimado	Inventário	Viabilidade	Projeto Básico	Construção	Operação	Total Geral
AC	1.058,00	62,50	0,00	0,00	0,00	0,00	1.120,50
AL	17,20	12,63	1.165,00	0,00	0,00	1.582,25	2.777,08
AM	12.677,00	7.216,10	0,00	7,03	0,00	274,96	20.175,09
AP	360,00	1.059,70	66,00	7,50	0,00	735,15	2.228,35
BA	324,48	1.590,99	3.037,90	382,17	0,00	6.869,51	12.205,05
CE	0,00	3,45	0,00	17,57	0,00	4,00	25,02
DF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	30,00
ES	213,30	627,12	0,00	54,19	0,00	557,91	1.452,52
GO	2.066,05	4.073,30	405,00	87,09	0,00	5.794,55	12.425,99
MA	292,00	430,31	894,00	2,50	0,00	663,18	2.281,99
MG	2.489,90	7.031,21	835,10	768,43	46,75	12.763,95	23.935,34
MS	842,51	953,07	0,00	761,40	10,44	3.664,38	6.231,80
MT	5.588,00	11.131,08	75,00	304,83	764,32	3.331,62	21.194,85
PA	5.154,00	23.047,63	930,00	711,84	0,00	21.180,60	51.024,07
PB	5,50	2,10	0,00	0,00	0,00	3,52	11,12
PE	0,00	303,88	500,00	22,12	0,00	757,77	1.583,77
PI	0,00	101,00	230,00	0,00	0,00	118,65	449,65
PR	1.471,68	3.829,39	1.610,83	936,72	350,20	16.104,35	24.303,17
RJ	545,20	843,73	130,00	143,80	9,60	1.474,40	3.146,73
RN	0,00	2,15	0,00	0,00	0,00	0,00	2,15
RO	3.183,79	477,13	0,00	57,10	30,00	7.774,18	11.522,20
RR	4.262,00	1.301,30	324,00	0,00	0,00	5,00	5.892,30
RS	1.745,10	3.515,16	146,00	356,97	0,00	4.537,38	10.300,61
SC	395,72	2.065,52	146,00	443,75	153,77	4.195,91	7.400,67
SE	0,00	0,00	1.165,00	0,00	0,00	1.581,00	2.746,00
SP	770,00	942,80	2.154,00	232,58	0,00	11.089,17	15.188,55
TO	156,60	2.151,08	1.824,00	127,00	0,00	2.327,48	6.586,16
Totais	43.618,03	72.774,33	15.637,83	5.424,59	1.365,08	107.420,87	246.240,73

Fonte: Sipot Eletrobrás (2018)

Segundo informações do SIPOT, o potencial hidrelétrico brasileiro total em dezembro de 2018 foi estimado em 246.240,73 MW de potência, sendo que deste valor, 107.420,87 MW estão em operação. O restante da potência representa estimativas de expansão, construção e estudos de viabilidade. Sabe-se ainda que, considerando este potencial, mais de 70% está concentrado nas bacias do Amazonas e do Tocantins/Araguaia (ELETROBRAS, 2018)

A região amazônica tem um dos maiores potenciais hídricos para geração de energia do mundo. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Brasil tem um potencial de 268 GW, dos quais apenas 30% está sendo aproveitado e 65% do potencial não aproveitado pertence à Amazônia.

“Admitamos que, por motivos de caráter social e ambiental, os planos de expansão do sistema elétrico sejam reformulados, para se limitar em 80% o potencial hidrelétrico a aproveitar na Amazônia - e que as hidrelétricas a serem implantadas na região amazônica aluguem 0,2 km^2 /MW. O que é uma hipótese conservadora, pois a maioria dos aproveitamentos existentes em outras regiões e em construção, na própria Amazônia, apresenta uma relação bem menor entre área inundada e potência instalada. Neste caso o aproveitamento do potencial hidrelétrico amazônico ocuparia cerca de 0,4% da área da região, ou seja, menos do que os grandes projetos agrícolas ou de pecuária. Mesmo assim, o Brasil poderá adicionar uma capacidade hidrelétrica de 148,7 GW aos 79,3 GW já instalados. Somando-se a isto os 17 GW das pequenas hidrelétricas, teremos uma capacidade hidrelétrica total de 245 GW”. (CARVALHO, 2010).

As usinas hidrelétricas de Belo monte, Santo Antônio e Jirau são bons exemplos que o País está, ainda a curtos passos, planejando explorar cada vez mais o potencial hídrico da região. A longo do trabalho será comentado mais especificadamente sobre as duas usinas Santo Antônio e Jirau, devido as mesmas serem construídas no Rio Madeira sendo o principal rio que banha a região a qual esse trabalho vai trata, além de utilizarem turbinas bulbo para a sua operação.

2.2 MANAUS E O POLO INDUSTRIAL

A capital do estado do Amazonas, Manaus, é a cidade mais populosa da Região Norte, com aproximadamente 2.182.763 habitantes (IBGE, 2019).

Essa aglomeração nesse grande centro urbano se deve principalmente ao uso das terras para a aquisição dos *commodities* (minérios e gêneros agrícolas) onde há uma modernização e

mecanização dos processos agrários, gerando menos empregos em áreas rurais (IBGE, 2013). Dessa maneira, há um grande êxodo rural na busca por melhores salários e condições de vida, seja no setor industrial e de bens de serviço. Contudo, esse deslocamento da população também propicia no acúmulo de riqueza nessa região, que conseqüentemente diminui o desenvolvimento dos outros municípios.

A zona franca é uma área de livre comércio, tratando-se de importações e exportações, além de incentivos fiscais especiais que atraem muitas indústrias anualmente, foi estabelecida com a finalidade de trazer tecnologia, investimentos e montar polos também no interior da Amazônia, tendo o aumento mais significativo no comércio até o final da década de 1980, seguido do aumento também na indústria agropecuária, abrigando projetos agroindustriais, reservatórios e tratamento para piscicultura, beneficiamento da madeira e fitoterápicos, além do crescente investimento em turismo. (ANDRADE, 2015).

A Zona Franca compreende três polos econômicos: industrial, comercial e agropecuário. O primeiro é o grande sustentador da zona, sendo que o PIM (Polo Industrial de Manaus) possui centenas de indústrias de alta tecnologia que geram mais de meio milhão de empregos. Os subsetores com maiores faturamentos são: eletroeletrônicos, duas rodas (motocicletas) e químico, respectivamente (FERREIRA; BOTELHO, 2014). Com isso, mesmo o Amazonas sendo um estado em que a maioria dos municípios vivem da piscicultura, agricultura e manejo de gado, há um grande polo industrial e altamente tecnológico que cresce a cada ano e conseqüentemente necessita de investimentos e suporte como infraestrutura e energia, como mostrado no gráfico 3.

Gráfico3 – Consumo de Energia Elétrica na Capital do Amazonas



FONTE: Amazonas Energia (2018)

O sistema de geração de energia do Amazonas, no ano de 2018, foi responsável pela geração de aproximadamente 8.813 Giga-Watts hora (GWh). Desse total, há diferentes frentes que contribuem para essa geração, parte foi recebido do Sistema Interligado Nacional (SIN) via a Linha de Transmissão (LT) Tucuruí-Macapá-Manaus; Aproximadamente 1/5 é proveniente de geração hídrica (Hidrelétrica de Balbina) e o restante de origem térmica, em sua maioria, trata-se de Usinas Termelétricas (UTE) movidas a óleo diesel e gás natural. A região norte também é prejudicada com a perda de energia, chegando a 30,1% e um prejuízo milionário. (EPE, 2018).

2.3 MICRORREGIÕES DO AMAZONAS

O estado do Amazonas se subdivide em 4 mesorregiões: a qual faz fronteira com o estado do Pará (Leste); Rondônia e Mato Grosso (Sul); Acre (Sudeste) e Roraima (Norte). Dentro dessas 4 mesorregiões o Amazonas se divide em 13 microrregiões, as quais somadas totalizam 62 municípios. Na Figura 1, pode-se ver mais detalhadamente a divisão das microrregiões e a nomenclatura. (IBGE, 2020)

Figura 1 – Mapa das Microrregiões do Amazonas



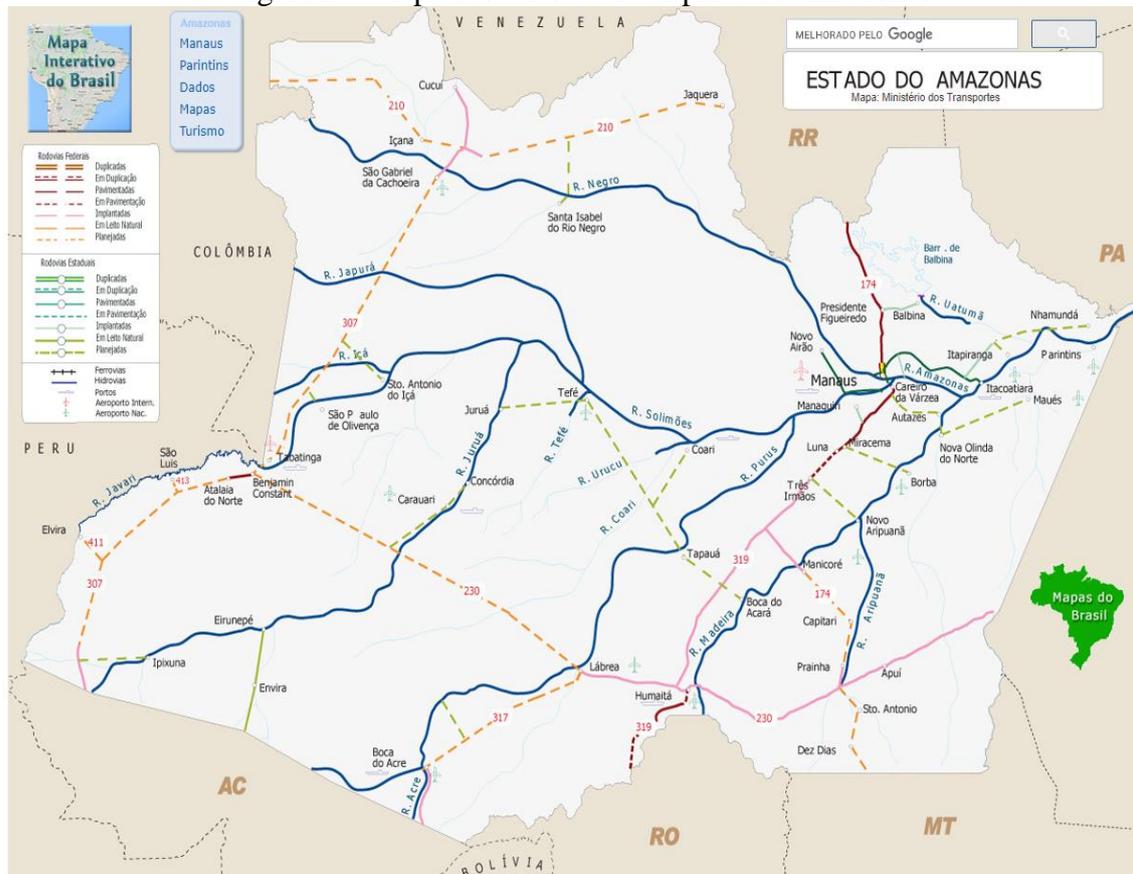
Fonte: IBGE (2017)

No interior do estado é comum a instalação de Termelétricas e sistemas isolados para gerar energias e abastecer os municípios e comunidades que vivem em áreas de difícil acesso (AMAZONAS ENERGIA, 2019).

Essa estratégia já se alastra por longos anos e anualmente são instaladas cada vez mais sistemas de geração movidos a diesel e gás natural, segundo o IPAAM, entre os anos de 2018 e 2019, já foram licenciadas mais 194 usinas Termelétricas para a geração de energia elétrica no interior do Amazonas, na qual uma das motivações apontadas pelo Instituto, foi o não atendimento da demanda energética da população. No Gráfico 4, pode ser visto que quase 50% da energia gerada é consumida pelas residências que consequentemente aumentará à medida que a população cresce. (LUCIANE ALMEIDA, 2020)

Na Figura 2, pode-se entender melhor essa realidade quando mostra os poucos meios de transporte que existem no estado e comparando o tamanho do mesmo, somado ao gigantesco número de pequenas comunidades que também estão espalhadas pelo território. A geração de energia baseada em óleo diesel é a mais comum no interior do estado, por conta da facilidade para instalação e poucas restrições em relação à área que será fixada, porém também existe um elevado custo, pois a manutenção e o transporte do combustível são situações que ocorrem com frequência e onera a energia. (RENDEIRO, 2008)

Figura 2 – Mapa das Vias de Transporte do Amazonas

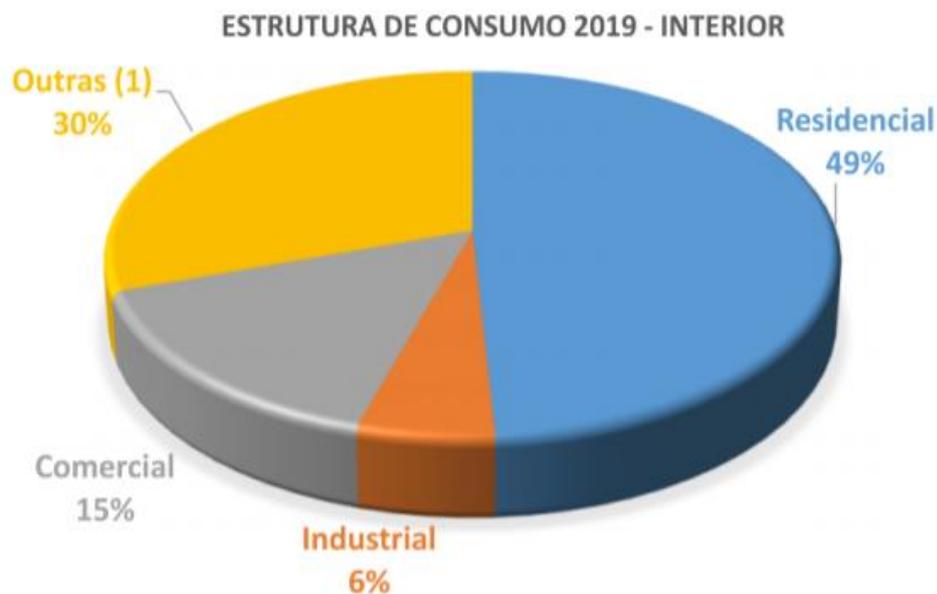


Fonte: Ministério da Infraestrutura (2020)

Em 2019, segundo o IBGE, a população do Amazonas cresceu 1,6% ao ano, se comparado com o ano de 2018, houve um aumento de 0,4%.

Os estados da Região Norte, como o Amazonas, têm um índice de natalidade um pouco maior do que outras regiões do país, na questão do crescimento natural ou vegetativo, principalmente nas áreas rurais, onde o crescimento de filhos por mulher ainda é maior. Nas áreas urbanas, a exemplo de Manaus, esse crescimento de filhos por mulher é maior acompanhando uma tendência global. (CASTRO, 2019)

Gráfico 4 – Estrutura de Consumo no Interior do Amazonas



Fonte: Amazonas Energia (2018)

2.3.1 Mesorregião Sul

A Mesorregião Sul, onde engloba as Microrregiões de Boca do Acre, Purus e Madeira são banhadas por dois grandes rios, o Rio Purus e o Rio Madeira, além de fazerem fronteira com estados do Norte, como o Acre e o Rondônia. (IBGE, 2020)

Este trabalho irá focar principalmente no Rio Madeira que passa por Rondônia e desagua no Rio Amazonas, um rio com correnteza fortes, grande vazão e presente no cotidiano de muitas comunidades da mesorregião sul o torna ideal para ser analisado.

2.3.1.1 Microrregião do Madeira

Essa Microrregião é conhecida pela passagem do Rio Madeira, a qual banha a maioria de seus municípios e comunidades, com um total de aproximadamente 200 mil habitantes que vivem nos principais municípios, os quais são Apuí, Borba, Humaitá, Manicoré e Novo Aripuanã. A economia da microrregião é sustentada pela agricultura, extrativismo vegetal, principalmente da madeira, e indústrias do meio agropecuário. (IBGE, 2020)

2.4 TERMELÉTRICA

Basicamente, centrais termelétricas funcionam com a transformação de energia térmica em energia mecânica que sequencialmente é utilizada para produzir energia elétrica.

(REIS, 2011, p 129) A Conversão da energia térmica em mecânica se dá através de um fluido que produzirá, em seu processo de expansão, trabalho em turbinas térmicas. O acionamento mecânico de um gerador elétrico acoplado ao eixo da turbina permite a conversão de energia mecânica em elétrica.

(REIS, 2011) Também comenta sobre a classificação das centrais termelétricas que dependem do seu método de combustão. As de combustão externa, são denominadas dessa forma pois o combustível a ser utilizado não entra em contato com o fluido de trabalho que percorre o sistema, normalmente é utilizada água desmineralizada, que vai para a caldeira até se transformar em vapor superaquecido, expandindo-se na turbina e produzindo trabalho mecânico, que conseqüentemente, movimentará um gerador para enfim produzir eletricidade. O vapor que sai da turbina é levado para o condensador, que retira calor do fluido e transformando-o novamente no estado líquido e realimentando o sistema. Os principais combustíveis aplicados são: óleo, carvão e biomassas.

Já nas centrais termelétricas de combustão interna o processo dentro do sistema ocorre de forma distinta. A combustão ocorre com a mistura de ar e combustível, dessa forma o fluido de trabalho que passará pelo sistema é o produto da combustão. Os principais combustíveis para esse sistema é o óleo diesel e o gás natural, que também são os mais utilizados no estado do Amazonas, por conta de sua estrutura mais compacta e de fácil instalação (REIS, 2011).

Na Figura 3 representada, trata-se de uma das grandes usinas termelétricas instaladas no Amazonas, de ciclo combinado, gás e vapor, onde em 2018 começou a gerar energia para abastecer a capital e o polo industrial de Manaus, com um potencial nominal instalado de 590,750 MW. (ELETROBRÁS, 2019)

Figura 3 – UTE Mauá 3 em Manaus



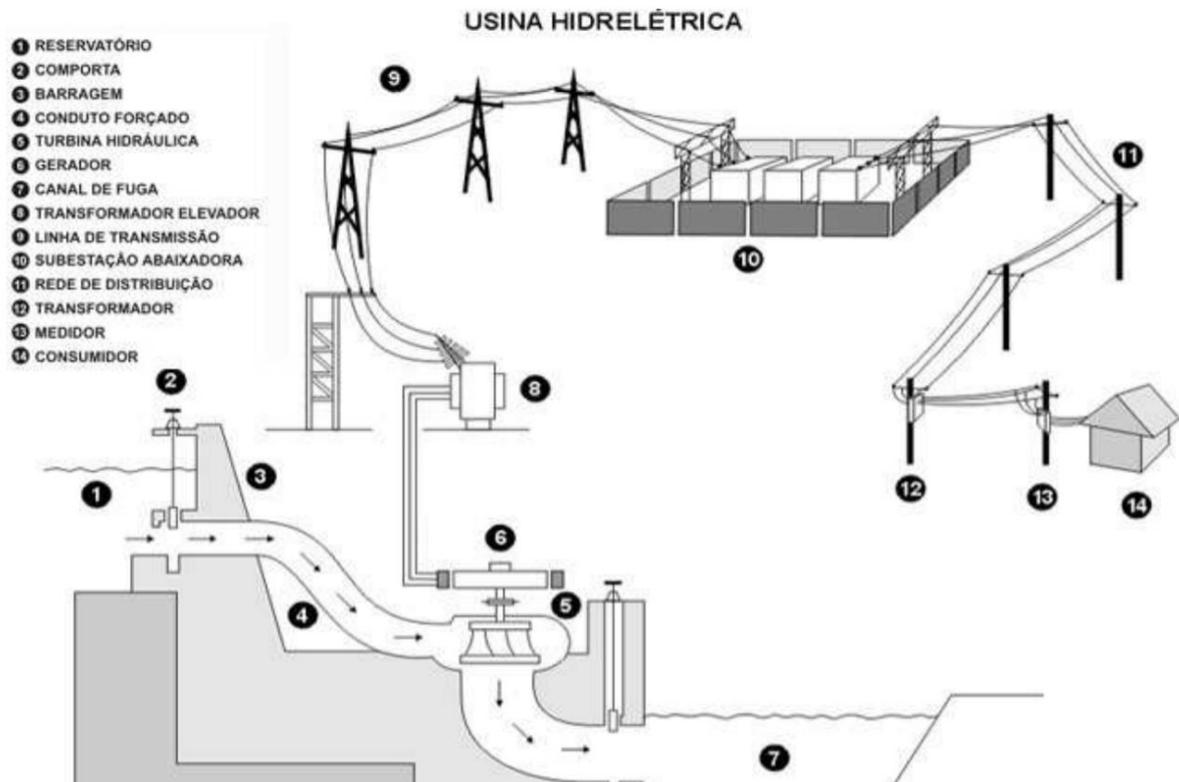
Fonte: Próprio Autor (2019)

Um dos maiores problemas das usinas Termelétricas é a grande contribuição que elas têm com o aquecimento global, devido a queima de combustível seja fóssil ou de materiais orgânicos, gera-se Dióxido de Carbono (CO_2), o qual é um dos maiores agentes causadores do efeito estufa e de chuvas ácidas. Há evidências que a intensificação do efeito estufa e as mudanças climáticas que ocorrem em diferentes localidades, assim como o aumento de aproximadamente $0,7^\circ\text{C}$ na temperatura média da superfície da Terra, podem estar relacionados ao aumento da concentração de alguns gases específicos na atmosfera, como o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O). Os quais são tecnicamente chamados Gases Efeito Estufa (GEE). A emissão destes gases pode ocorrer por diversos motivos, como a queima de combustíveis fósseis nos veículos de transporte, desde carros a aviões, geração de energia, atividades relacionadas a processos industriais, agropecuária, disposição de lixo e desmatamento (BRASIL, 2009).

2.5 HIDRELÉTRICA

As Hidrelétrica consistem em uma estrutura de captação de água para a produção de energia elétrica mediante a transformação de energia hidráulica. As centrais Hidrelétrica localizam-se normalmente nos leitos dos rios ou em zonas onde as águas desaguam em superfícies líquidas naturais ou artificiais (ZULCY, 2018).

Figura 4 – Esquema de Usina Hidrelétrica.



Fonte: FURNAS (2010)

A energia de hidrelétricas, dentre as fontes mais utilizadas pelo Brasil, é a mais barata por ser uma fonte renovável e de abastecimento contínuo, além do potencial hídrico que o país detém. Contudo, assim como outros sistemas de geração, não deixa de ser isenta de gerar poluição (ELETROBRÁS, 2008). Projetos mal executados podem levar grandes desastres ambientais, sociais e econômicos, já que as grandes centrais trabalham com gigantescos volumes de água para conseguir gerar energia elétrica suficiente.

O cálculo da potência instalada de uma usina hidrelétrica é efetuado por meio de estudos de hidroenergéticos e mecânica dos fluidos, baseado em cálculos e variáveis para geração esperada e o investimento necessário. A energia hidráulica armazenada nos reservatórios é convertida em energia mecânica, por meio de uma turbina hidráulica que converte essa energia em movimento, para assim girar o eixo do gerador e produzir energia, sendo a energia elétrica transmitida para uma ou mais linhas de transmissão que é interligada à rede de distribuição (ZULCY, 2018).

Por muito tempo as hidrelétricas foram divulgadas como fontes de energia limpa, mas desde o início do século XXI, novos fatores começaram a ser incluídos nesses casos. A formação das bacias de grandes reservatório, exige por vezes um grande desmatamento, além de grandes áreas alagadas, sendo por si só, um fator de emissão de gases estufa produtores do aquecimento global, podendo também produzir severos impactos ambientais e sociais, como: o bloqueios dos ciclos de cheia e vazante dos rios; impedimento dos ciclos reprodutivos de peixes; modificação em larga escala do ecossistema e a distribuição geográfica de espécies. Por esse motivo, há uma tendência de fuga de investimentos na geração de energia hidrelétrica, principalmente nos estados localizados mais ao norte do país, os quais são detentores da maior parte do potencial hidráulico, mas também são os estados com a maior densidade de floresta e tribos indígenas. (ROSA, 2007)

2.5.1 Tipos de Usinas Hidrelétrica

A classificação de uma usina hidrelétrica pode ser feita em função das seguintes variáveis: altura da queda d'água, potência instalada e tipo de reservatório. Na Tabela 2 pode ser visto que a diferença na nomenclatura de cada central hidrelétrica depende diretamente de sua potência. Segundo a ANEEL, ela também adota três diferentes classificações com relação à potências das centrais geradoras, como: Centrais Geradoras Hidrelétrica (CHG) as quais têm até 1MW de potência instalada, Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) entre 1,1 e 30MW de potência instalada e Usinas Hidrelétricas de Energia (UHE) acima de 30 MW.

Tabela 2 – Classificação de Centrais Hidrelétrica por Potência

Classificação	Potência (P)
---------------	--------------

Micro	$P \leq 100\text{KW}$
Mini	$100\text{KW} < P \leq 1 \text{ MW}$
Pequena	$1 \text{ 000KW} < P \leq 30 \text{ MW}$
Média	$30 \text{ 000KW} < P \leq 100 \text{ MW}$
Grande	$P \geq 100 \text{ MW}$

Fonte: Reis (2011)

A altura da queda d'água e o tipo de reservatório também são características importantes a serem levadas em consideração ao denominar o tipo de Central Hidrelétrica. Na Tabela 3 há uma relação da altura da queda e a nomenclatura, devido os diferentes ambientes que o sistema hidráulico pode ser instalado a definição é importante para a aquisição de equipamentos específicos para cada CH.

Tabela 3 – Classificação de Centrais Hidrelétrica pela altura de queda d'água

Classificação	Altura (H)
Baixíssima	$H < 10 \text{ metros}$
Baixa	$10 \text{ metros} < H < 50 \text{ metros}$
Média	$50 \text{ metros} < H < 250 \text{ metros}$
Alta	$H < 250 \text{ metros}$

Fonte: Reis (2011)

Com relação ao tipo de reservatório, há três tipos comumente utilizados:

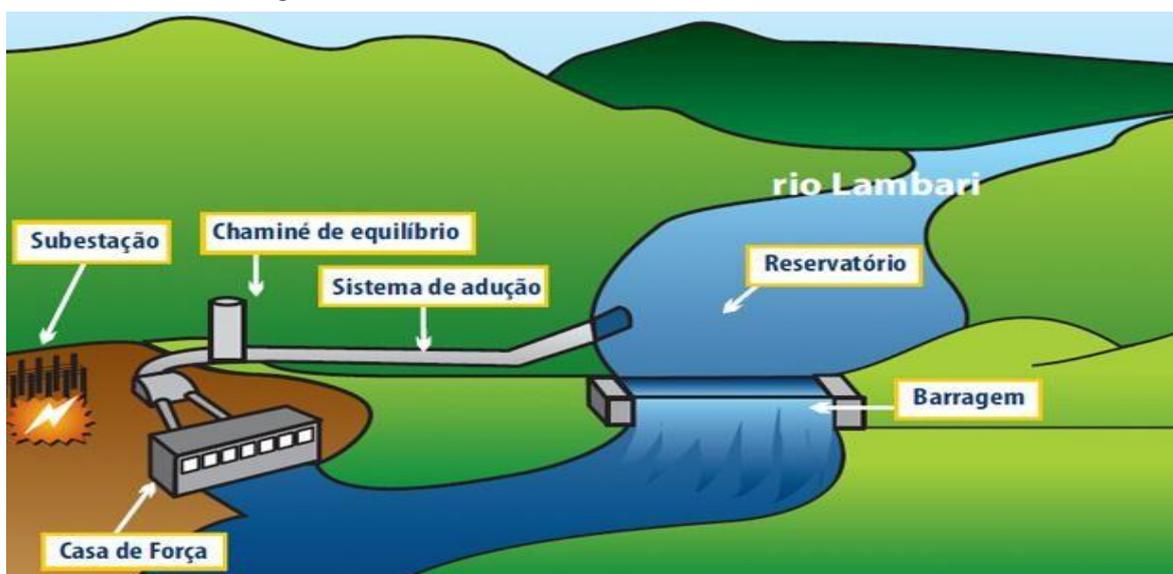
- Acumulação ou armazenamento: Localizados geralmente nas cabeceiras dos rios e em locais de alta queda. Permitem grande acúmulo de água devido ao grande porte e reservatório, que nos períodos de estiagem funcionam como estoque. E também, como são localizadas a montante das demais centrais hidrelétricas, ou seja, numa cota mais elevada, regulam a vazão de água que irá passar pelas outras, permitindo uma operação integrada do conjunto de usinas.
- Fio d'água: são as usinas que não possuem um reservatório grande ou significativo, operam com queda constante e vazão não controlada. O reservatório de acumulação é suficiente para ajuste diários ou semanais.
- Reversíveis: As usinas reversíveis são usinas que podem gerar energia elétrica, através da queda da água de um reservatório localizado a montante para outro a jusante, ou armazenar água em um nível mais elevado, através do bombeamento da água de um reservatório a jusante para outro a montante. Às vezes, pode existir mais de dois

reservatórios e apenas uma usina de bombeamento é utilizada para elevar a água num sistema de reservatórios. (REIS, 2011)

2.5.2 Pequena Central Hidrelétrica

As Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) são usinas hidrelétricas de tamanho e potência relativamente reduzidos. Diferente das Hidrelétricas, essas unidades geradoras são diferentes em dois principais pontos: A diferença do tamanho de seus reservatórios e a capacidade de geração. Falando de suas características técnicas, a potência já foi mencionada na Tabela 2, a área máxima do seu reservatório é de 3,0 Quilômetros quadrados (Km^2) e pode ser utilizada em diferentes tipos de reservatórios. (ANEEL, 2003)

Figura 5 - PCH Cristina – Rio Lambari Cristina - MG



Fonte: Grupo Energisa S.A. (2014)

2.6 TURBINAS HIDRÁULICAS

Apesar das hidrelétricas serem construções complexas, vinculadas à engenharia civil, elétrica e mecânica, além de diversos dispositivos eletrônicos e cálculos complexos para a sua implementação, a peça chave para o pleno aproveitamento dos recursos hídricos e geração de energia é a escolha da turbina adequada.

As turbinas hidráulicas possuem o seu funcionamento em comum. A água que entra na turbina vem de um reservatório ou de um nível mais alto de um rio e sai para um canal de nível mais baixo. A água que entra é conduzida por um duto fechado até um conjunto de palhetas ou injetores que transferem a energia mecânica (energia de pressão e energia cinética) do fluxo de água em potência de eixo pela turbina. A pressão e a velocidade da água na saída são menores que na entrada, devido a perdas de energia causada por atritos e a troca de energia com a turbina, já a água quando sai da turbina é conduzida por um duto até um canal inferior e sendo despejada no córrego do rio. As principais causas de uma diminuição na eficiência das turbinas são as perdas hidráulicas e mecânicas. Atualmente, a eficiência de uma turbina hidráulica está em torno de 85% a 95%. (REIS, 2011)

2.6.1 Classificação das Turbinas Hidráulicas

Dentre as formas de se classificar uma turbina, há duas denominações gerais, as quais são a variação da pressão estática, ação ou impulso e reação:

- Ação ou impulso: a pressão na tubulação cai até a pressão atmosférica logo que a água sai do distribuidor. A energia cinética aumenta na passagem de saída do distribuidor e perde intensidade ao atingir as pás, de modo que, a velocidade da água ao sair da pá é menor do que quando a atingiu. Exemplo: Turbina Pelton.

- Reação: a energia de pressão cai desde a entrada do distribuidor até a saída do receptor, aumentando no difusor. O difusor é essencial nesses tipos de turbinas. Exemplo: turbinas Francis e Kaplan.

Há também a direção do fluxo através do rotor, radial, axial, tangencial, diagonal:

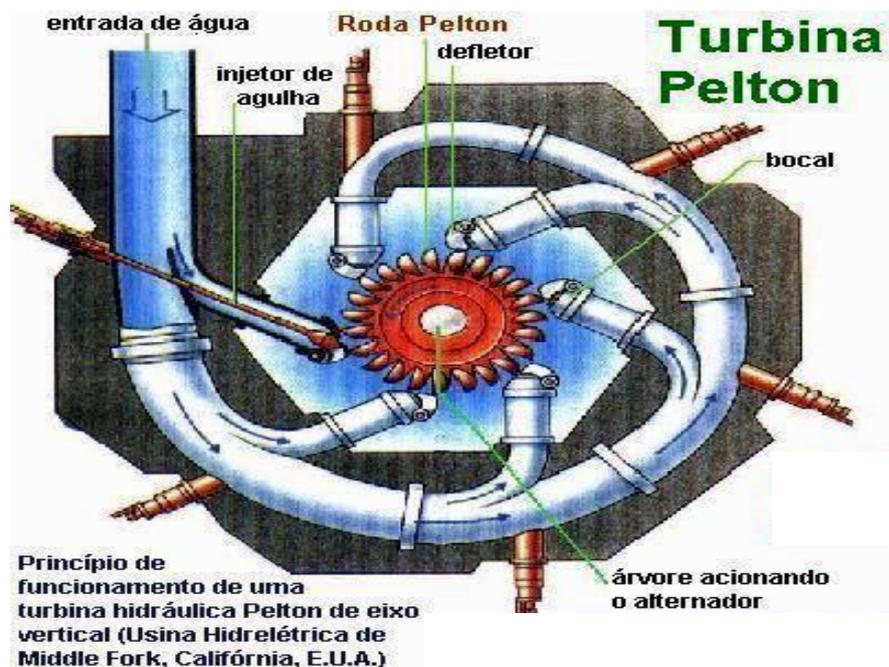
- Radial: o fluxo é aproximadamente perpendicular ao eixo de rotação. Exemplo: turbina Fourneyron.
- Axial: o fluxo é aproximadamente paralelo ao eixo de rotação. Exemplos: turbinas Kaplan, Bulbo, Straflo
- Tangencial: o fluxo de água é lançado sob a forma de um jato sobre um número limitado de pás. Exemplo: turbina Pelton.
- Diagonal: o fluxo muda gradativamente da direção radial para a axial. Exemplo: turbina Francis.

2.6.2 Turbina Pelton

Küuffner (2006) identifica que a turbina tipo Pelton foi inventada por Lester Allan Pelton (1829-1908). Com características de arranjo que, em muito, faz recordar as antigas – e também atuais –, rodas d'água. A turbina Pelton foi patenteada em 1880 e a primeira unidade em operação foi instalada na cidade de Nevada, Estados Unidos. Tecnicamente, é uma turbina de ação, ou seja, a água é direcionada a sua roda, produzindo sua rotação num ambiente aberto. Sua aplicação é recomendada em situações de projeto em que há altas quedas de água. A variação de potência é regulada pelo controle de entrada de água através de bicos injetores que se posicionam diretamente em frente a roda da turbina. Esta tem a concepção de monobloco e não oferece flexibilidade operacional própria. (KÜUFFNER, 2006)

Assim como todas as turbinas, a Pelton possui um distribuidor e um rotor. O distribuidor possui um formato de bocal injetor que guia o fluxo de água proporcionando um jato cilíndrico sobre a pá do rotor. O Rotor tem um determinado número de pás que possuem um formato de concha e são presas na periferia de um disco que gira em torno de um eixo, como pode ser visto na Figura a baixo.

Figura 6 - Desenho Artístico de Turbina Pelton.



Fonte: Marques (1999)

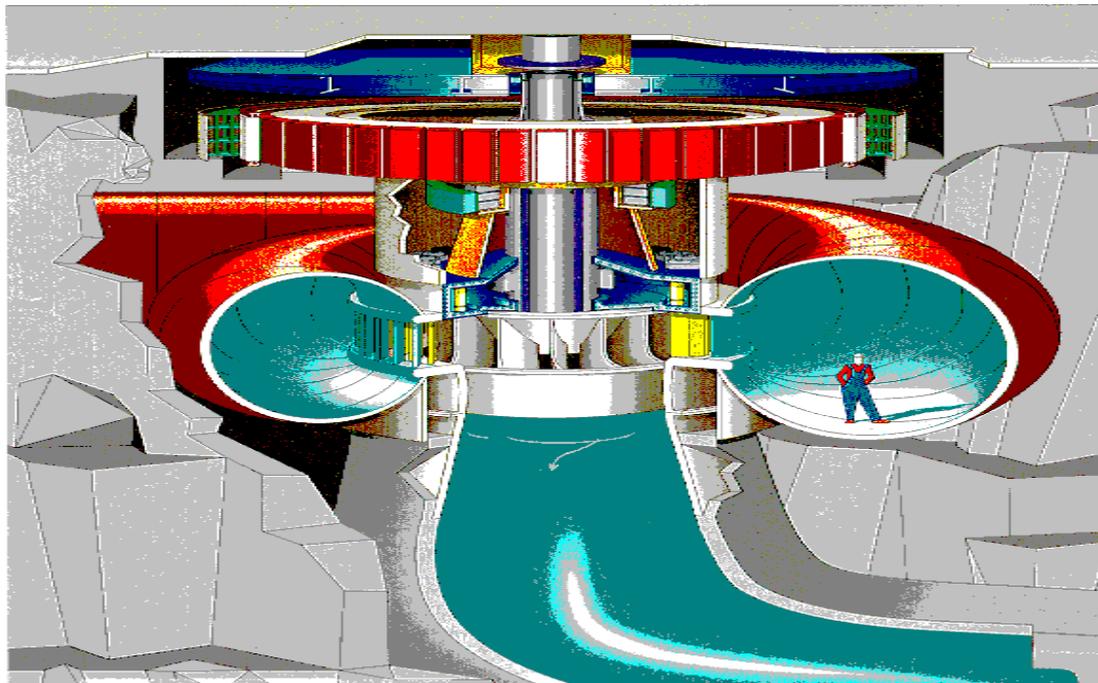
2.6.3 Turbina Francis

A turbina tipo Francis deve ser aplicada para um volume de água determinado. Embora possua componentes de controle de passagem de vazão de água, este tipo de turbina tem uma acentuada perda de performance quando há variações de vazão. Outra característica técnica deste tipo de turbina é a falta de flexibilidade a variações de quedas, desta maneira, a queda d'água deve obedecer a variações pequenas, pois não há qualquer mecanismo na turbina que possibilite seu ajuste a variações de quedas.

As turbinas Francis possuem então uma ampla faixa de operação, com excelentes rendimentos; principalmente em aproveitamentos de médias quedas, podendo até mesmo trabalhar em algumas centrais de pequenas e grandes quedas d'água. Os componentes básicos das turbinas Francis são os seguintes: caixa espiral, pré-distribuidor, distribuidor, sistema de controle e acionamento do distribuidor, rotor Francis, tubo de sucção, eixo e mancais.

Esta turbina também compõe em uma série de canais hidráulicos que ao receberem água radialmente, exercem trabalho sobre as aletas fazendo a turbina e o gerador rodarem, e no fim, libera a água pelo tubo de sucção numa direção axial. Sua aplicação é para um volume de água determinado, apesar de ter componentes para controle de vazão, há uma acentuada perda de desempenho para variações de vazões. Outra característica é a pouca flexibilidade a variações de queda de água, na qual a turbina deve operar a pequenas variações de queda. Apesar destas imperfeições, ela ainda assim é muito aplicada no Brasil, podendo operar em quedas de até 600 metros e também para grandes ou pequenas vazões. (Miranda, 2009)

Figura 7 – Ilustração de Burbina Francis.



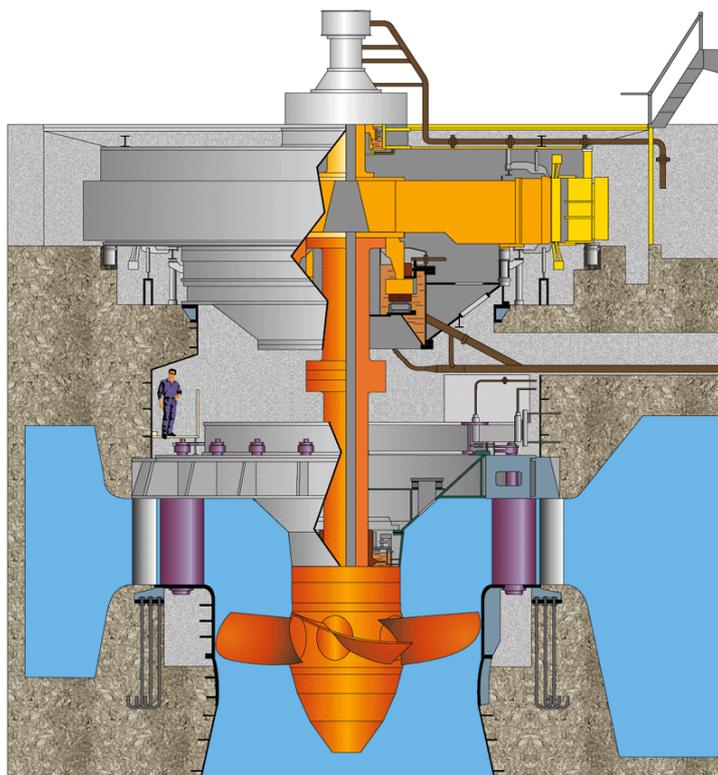
Fonte: Alstom Brasil (2008)

2.6.4 Turbina Kaplan

As turbinas Kaplan foram criadas pelo engenheiro austríaco Victor Kaplan (1876-1934) que criou um novo modelo de turbina a partir das turbinas de Hélice com a possibilidade de variar o passo das pás. Desenvolvendo então uma turbina de Hélices com pás reguláveis. Sendo responsável pela grande evolução na técnica de construção e aproveitamento de geração hidráulica, especialmente por apresentar excelente eficiência para aplicação em baixa queda e, em especial, variação da vazão turbinada, o que a difere tecnicamente das demais turbinas e, particularmente, em relação às turbinas tipo Francis. O método de regular as pás para a vazão adequada proporciona à turbina Kaplan atuar em hidrelétricas com grandes vazões, baixa altitude e ainda assim gerando grande eficiência. (SOUZA, 1991)

Os principais componentes de uma turbina Kaplan são: o distribuidor, suas pás são chamadas de diretrizes, rotor, tubo de sucção e caixa espiral. As turbinas Kaplan são adequadas para operar em baixas alturas de queda e com grandes e médias vazões. (SOUZA, 1991)

Figura 8 – Ilustração Turbina Kaplan.



Fonte: Alstom Brasil (2008)

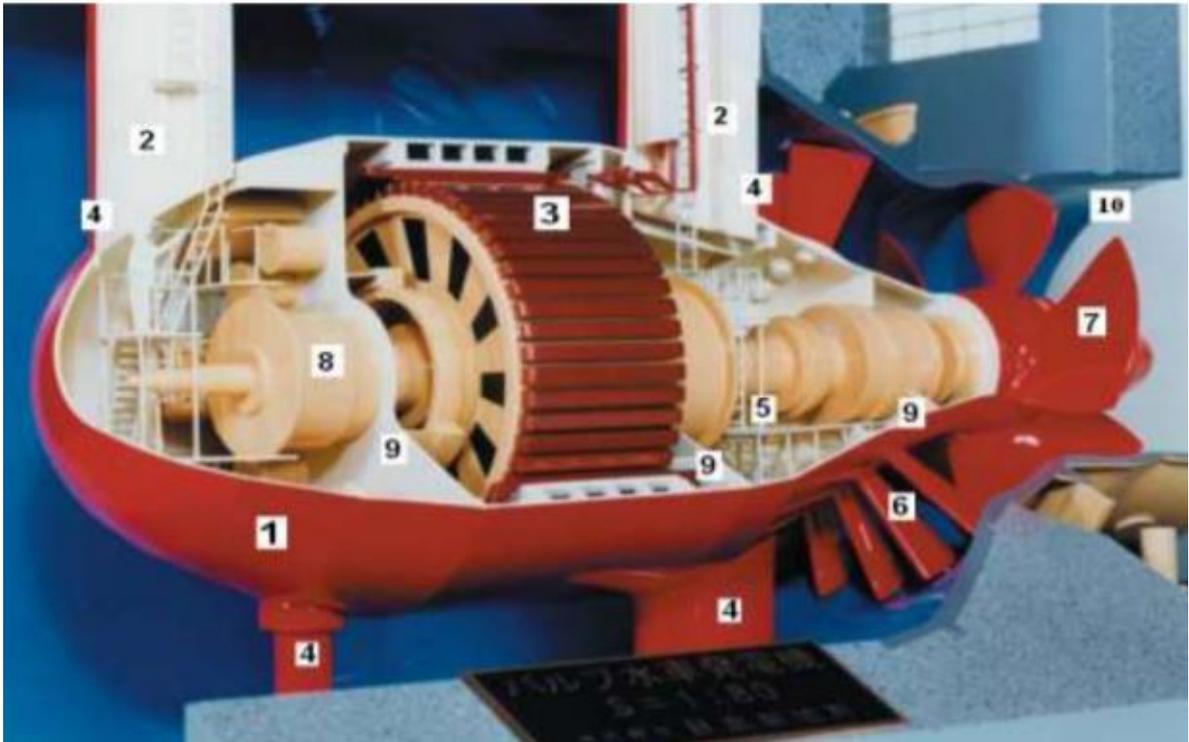
2.6.5 Turbina Bulbo

As turbinas Bulbo (consolidadas industrialmente na década de 1960) são um arranjo especial de turbinas axiais, a maioria delas com a tecnologia de dupla regulação das turbinas Kaplan (podem existir turbinas Bulbo do tipo Hélice, que não possuem dupla regulação). Essas turbinas são especialmente adequadas aos aproveitamentos de baixíssimas quedas ($H < 20\text{m}$) e altas vazões, como as que ocorrem em vales e rios de planície. Ainda que devido as características da Bulbo, pode-se concluir que são uma evolução das turbinas Kaplan para aplicações de baixíssima queda, resultando em melhor desempenho hidrodinâmico (maior rendimento médio, maior capacidade de descarga, mais ampla faixa operacional) e arranjo mais compacto e barato para a casa de máquinas. As principais dificuldades num projeto Bulbo, porém, são suportar grandes esforços numa linha de eixo horizontal e os problemas inerentes à refrigeração de um gerador encapsulado. Essas são especialmente as maiores restrições para a implementação desse tipo de turbina em centrais de médio e grande porte. (SANTOS, 2012)

Os seus principais componentes apresentados pela figura 9 são os seguintes:

1. Nariz do Bulbo: consiste de uma cápsula que isola o gerador e outros componentes do contato com a água. O seu perfil é tal que favoreça a um bom escoamento do fluxo d'água;
2. Tubos ou poços de acesso: são canais de passagem para os operários realizarem a manutenção dos equipamentos;
3. Rotor do gerador: máquina síncrona de pólos salientes. O número de pólos é determinado pela rotação da máquina;
4. Estruturas de sustentação: suportam rigidamente o conjunto, descarregando os esforços para a estrutura de concreto;
5. Eixo árvore: transmite a potência gerada pela turbina ao gerador;
6. Distribuidor: regula o fluxo d'água. Como pode se ver, fica próximo ao rotor;
7. Rotor da turbina: podendo ser do tipo Kaplan ou do tipo hélice (mais detalhes na figura 3.22);
8. Porta-anéis coletores e cabeçote Kaplan;
9. Mancais: dão suporte mecânico ao eixo, permitindo o movimento de rotação e impedindo o de translação;
10. Tubo de Sucção: difusor hidráulico do tipo reto.

Figura 9 – Vista em Corte de uma Turbina Bulbo



Fonte: Hitachi (2006)

3. METODOLOGIA

O presente trabalho consiste no estudo de caso de cunho descritivo, o qual se dará pela exploração e apresentação dos dados, sendo necessário avaliar e analisar informações que sustentem as afirmações e o desenvolvimento do trabalho, estudando a problemática da situação energética do estado do Amazonas e tendo como objeto de estudo a microrregião do Madeira. O trabalho tem como estrutura fundamental um referencial teórico atual de Hidrelétricas, abordando de forma sucinta os principais componentes que o constituem, especificidades da região, hidrografia e a possibilidade de implantação de uma PCH do tipo bulbo na região, além dos resultados que poderão ser gerados.

A partir deste estudo, apresenta um levantamento descritivo acerca da viabilidade de um sistema hidrelétrico na microrregião do Madeira, localizada na Mesorregião Sul do estado do Amazonas, para então dimensionar e aferir com mais precisão quais resultados a implantação de uma pequena central hidrelétrica traria para essa região e como esses dados podem ser usados para atestar e validar a sua implementação.

Assim como foi mostrado nos itens 2.2, o estado do Amazonas tem as suas particularidades que o difere dos outros estados brasileiros, pela sua densa e extensa floresta, os municípios e a comunidade encontram-se dispersos pelo maior estado do Brasil. Devido a isso, não apenas os municípios se encontram dispersos, como comunidades que começam a se formar e também se espalham pelo território, dificultando a distribuição de energia para as comunidades mais afastadas. Por esse custo amazônico, que engloba grandes distâncias e áreas de preservação, cresce anualmente o número de sistemas isolados alimentados por combustíveis fósseis.

Como pode ser visto pela Figura 10, perceber-se que a maioria dos sistemas isolados se concentram na região amazônica, o SIN consegue se estender por quase todo o Brasil e manter um sistema de alimentação constante, vinculado com as matrizes geradoras. Contudo, atualmente a concentração de termelétricas se encontra na região amazônica e em maior quantidade no estado do Amazonas devido à dificuldades geográficas e limitações de acesso.

Esse trabalho trata da viabilidade de instalação de Pequenas Centrais hidrelétricas (PCH) pensando na Mesorregião Sul do Amazonas, a priori nos municípios da microrregião do Madeira, que se tratam de cidades com populações pequenas e sofrem com um sistema

termelétrico que se torna caro e carente de manutenções e acompanhamento, como já foi mostrado no capítulo 2.4.

Figura 10 – Mapa Dinâmico de Sistemas Isolados



Fonte: ONS (2020)

3.1 LEVANTAMENTO POPULACIONAL DA REGIÃO

A mesorregião sul do Amazonas tem em média 350 mil habitantes, contando com as microrregiões de Boca do Acre, Purus e Madeira. Esse trabalho irá se basear nesse número para o presente estudo, buscando atender a essa população, baseado no levantamento anual da ANEEL e o consumo médio de energia elétrica do estado. A Tabela 4 mostra mais detalhadamente o consumo médio de energia elétrica na região, o qual vai embasar o estudo para estimar a energia necessária para abastecer os municípios com fornecimento de energia hidráulica.

Tabela 4 – Consumo Médio Total por Subsistema, Região e UF Norte (kWh/mês)

	2014	2015	2016	2017	2018	Δ% (2018/2017)	
Brasil	512,7	490,6	477,3	472,1	472,8	0,2	Brazil
Norte	568,1	566,7	551,9	531,7	490,6	-7,7	North
Acre	307,8	330,8	332,5	340,2	305,5	-10,2	Rondônia
Amapá	444,4	446,6	464,2	438,9	428,4	-2,4	Acre
Amazonas	607,5	589,7	528,1	499,3	496,4	-0,6	Amazonas
Pará	701,7	697,3	685,8	651,4	568,3	-12,8	Roraima
Rondônia	434,9	428,9	402,8	403,8	409,3	1,4	Pará
Roraima	465,9	493,0	489,3	473,0	481,0	1,7	Amapá
Tocantins	297,1	304,7	320,6	324,1	328,0	1,2	Tocantins
Nordeste	331,1	315,8	309,2	304,3	302,9	-0,5	Northeast

Fonte: ANEEL (2019)

3.2 HIDRELÉTRICA DE SANTO ANTÔNIO E JIRAU

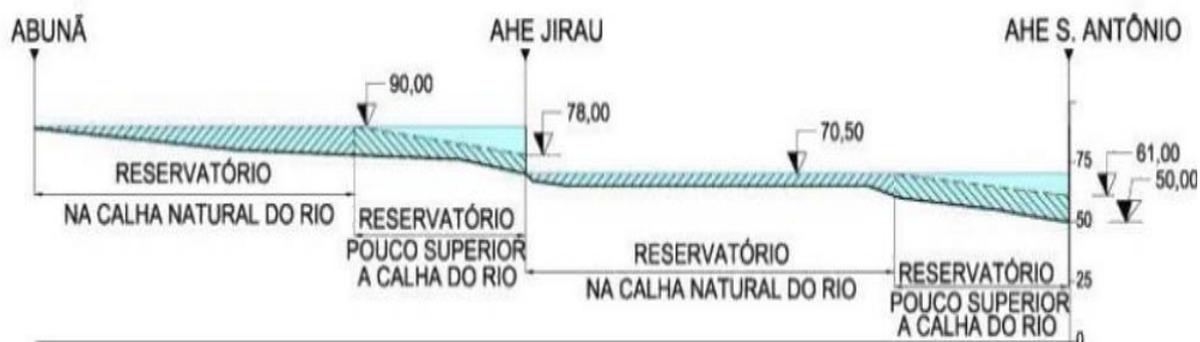
As duas Hidrelétricas construídas a montante em Rondônia (RO) no rio madeira, Jirau e Santo Antônio, assim como Belo Monte, mostram que o País está começando a aproveitar mais o potencial hídrico que a região amazônica detém e aumentar sua geração de energia, que além das construções gerarem quantidade de energia significativa, são fontes renováveis.

Na Figura 11, mostra-se a alternativa utilizada para a implantação das duas hidrelétricas, de forma que foram implantadas no mesmo rio e com estruturas semelhantes, diferenciando-se na distância de entre suas instalações, onde as represas de uma das usinas capta água no seu reservatório para gerar energia e depois despejar a mesma água em um segundo reservatório.

Outro fator a ser levantado é o desenvolvimento econômico que trouxe para a região, aumentando o status da capital, Porto Velho, para o status de “grande cidade” e injetando R\$42 bilhões na economia de RO. Ou seja, além de levar mais tecnologia e autonomia energética, também ajuda no desenvolvimento econômico da região e conseqüentemente no aumento da circulação do dinheiro. Contudo, há comentários contrários à instalação UHE na região amazônica devido aos impactos ambientais que são causados.

Figura 11 – Ilustração do Sistema para Acúmulo de Água das Hidrelétricas

II- ALTERNATIVA COM DUAS USINAS DE BAIXA QUEDA => ALTERNATIVA SELECIONADA



Fonte: FEMEC (2016)

As Hidrelétricas de Jirau e Santo Antônio são duas grandes construções planejadas para abastecer as regiões Norte e aumentar as reservas de energia para o SIN, em especial os estados de Roraima e Acre são os mais beneficiados na região norte.

As Hidrelétricas de Jirau e Santo Antônio respectivamente, tem uma potência instalada de 3.300MW e 3.150MW, com uma inundação a montante em área do reservatório chegando a 0,03% sendo considerado um nível de inundação muito baixo em comparação com hidrelétricas já instaladas no estado, que inundam uma área maior e geram menos energia. Utilização de turbinas Bulbo no sistema gerou um rendimento melhor que outras hidrelétricas já instaladas, já que o rio Madeira é um rio com grande volume de água e baixa queda, ideal para essa turbina, proporcionando uma menor área alagada, como pode ser visto na Tabela 5.

Os dados mostram-se mais expressivos quando comparados a usina de Balbina com a de Santo Antônio, onde a diferença da área inundada é extremamente expressiva, ainda mais quando se leva em relação a quantidade de energia que é gerada.

As duas usinas de Jirau e Santo Antônio são dois grandes exemplos que a exploração do potencial hídrico que há na bacia amazônica pode ser feita com responsabilidade, baixo impacto ambiental e gerando quantidade significativa para o sistema elétrico brasileiro. No mais, pela aplicação ter sido feita no Rio Madeira e ambas se encontrarem em pleno funcionamento, as possibilidades instalações na região amazonense também são altas.

Tabela 5 – Comparativo das Usinas Implantadas na Bacia Hidrográfica do AM

Usinas	Reservatórios (Km ²)	Potência (MW)	Área inundada / Potência Instalada (Km ² / MW)
Balbina	2360	250	9,44
Samuel	584	217	2,69
Manso	387	210	1,84
Tucuruí (1 ^a Etapa)	2414	4000	0,61
Tucuruí (2 ^a Etapa)	2414	8000	0,3
Santo Antônio	271,3	3150	0,11
Jirau	258	3300	0,13

Fonte: Próprio Autor (2020)

3.3 IMPACTOS AMBIENTAIS E SUSTENTABILIDADE

Sabe-se que as grandes hidrelétricas causam impactos no meio ambiente ao qual estão sendo construídas. Necessita-se fazer desvios dos rios, retirar vegetação, fazer terraplanagem e após a represa ser construída, parte da área ao redor da barragem é alagada, prejudicando vidas silvestres e a comunidade que vive próximo ao local. Dessa forma é preciso levar em consideração todos os possíveis afetados pelas grandes hidrelétricas.

A UHE de Belo Monte e a UHE de Balbina são dois exemplos dos desastres ambientais e sociais que a construção de usinas de grande porte e reservatórios podem causar ao serem construídas na região amazônica sem o devido planejamento e implementação.

A hidrelétrica de Balbina é reconhecida como um dos maiores impactos ambientais já causados no Brasil por Hidroelétricas, devido a grande área que foi alagada e a pouca energia que produz, como pode ser visto na Tabela 5. Assim como Belo Monte é hoje criticada pelos diversos desastres ambientais que fora causado para sua construção.

3.4 EXPRESSÃO MATEMÁTICA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

A geração de energia elétrica é a transformação da energia potencial da água armazenada no reservatório em energia mecânica através da turbina, que, por conseguinte, é

transformada em energia elétrica pelo gerador. Após essa conversão, utilizando uma subestação elevadora de tensão, a potência é injetada no sistema de transmissão para que seja entregue ao centro de consumo. Segunda Encina (2006) a dedução da expressão matemática que representa a geração de energia, pode ser representada conforme equacionamento a seguir. Inicialmente, tem-se:

$$de_p = dm \cdot g \cdot h \quad (1)$$

em que:

de_p é a variação incremental na energia potencial (J);

dm é a variação incremental da massa de água armazenada no reservatório (kg);

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

h é a altura de queda bruta (m), definida como a diferença entre os níveis a montante e jusante da usina.

A variação da massa d'água é convertida em variação de volume, levando em conta o peso específico d'água, como visto a seguir:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2)$$

Em que:

ρ é o peso específico da água (kg/m^3);

m é a massa (kg);

v é o volume (m^3).

Da equação (2), pode se obter:

$$dm = \rho \cdot dv \quad (3)$$

Substituindo (3) em (1), tem-se:

$$de_p = \rho \cdot dv \cdot g \cdot h \quad (4)$$

Considerando a energia potencial variando em um intervalo infinitesimal, a equação (4) pode ser reescrita como:

$$\frac{de_p}{dt} = \rho \cdot \frac{dv}{dt} \cdot g \cdot h \quad (5)$$

$$q = \frac{dv}{dt} \quad (6)$$

$$p = \frac{de_p}{dt} \quad (7)$$

Substituindo (6) e (7) em (5), tem-se:

$$P_b = \rho \cdot q \cdot g \cdot h \quad (8)$$

A equação (8) representa a potência bruta (P_b) relacionada com uma determinada vazão turbinada q considerando uma altura de queda bruta h . Por existir à fricção d'água nos sistemas de adução, existem perdas expressas em termos de altura de queda. Assim, definimos queda líquida como a diferença entre a queda bruta e a perda hidráulica existente, sendo representada pela seguinte equação:

$$h_l = h - h_p \quad (9)$$

em que:

h_l é altura de queda líquida (m);

h_p é a perda hidráulica (m).

Para o cálculo da perda hidráulica consideram-se as perdas por atrito devido à passagem de água pelo conduto forçado, aos quais dependem do comprimento dos condutos, diâmetro e rugosidade das paredes internas do conduto forçado e da caixa espiral. Pode ser representada pela função quadrática a seguir:

$$h_p = k \cdot q^2 \quad (10)$$

em que:

k é a constante característica do sistema de adução (s^2/m^5);

q é a vazão turbinada (m^3/s).

A turbina tem como função a transformação da potência hidráulica em mecânica, a qual depende da vazão turbinada, altura da queda líquida e da eficiência da própria turbina (η_t). Assim é possível obter a expressão matemática para a potência mecânica desenvolvida pela turbina como sendo:

$$p_m = \rho \cdot q \cdot g \cdot h_l \cdot \eta_t \quad (11)$$

Para a transformação de potência mecânica em elétrica, o eixo da turbina fica acoplado com o gerador. Dessa forma, também temos a influência do rendimento do gerador, isto é:

$$P = \eta_g \cdot p_m \quad (12)$$

Acima η_g é o rendimento do gerador. Substituindo (11) em (12), obtém-se a seguinte expressão:

$$P = \rho \cdot g \cdot q \cdot h_l \cdot \eta_t \cdot \eta_g \quad (13)$$

Considerando o peso específico d'água igual a $1000 \text{ kg}/m^3$, a aceleração da gravidade $9,81 \text{ m}/s^2$ e multiplicando por 10^{-6} para obter a expressão em MW, obtém-se:

$$P = 9,8 \cdot q \cdot h_l \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot 10^{-3} \quad (14)$$

3.4 PERDA DO SISTEMA DE ADUÇÃO

Visto na seção anterior, a perda hidráulica é a energia potencial transformada em outros tipos de energia durante a passagem da água pelo conduto. Isto decorre devido ao atrito com as paredes do tubo e a viscosidade do líquido em escoamento. Como apresentado na equação (10),

esta perda é resultante da constante característica do sistema de adução e do quadrado da vazão turbinada. Sendo assim, para obter-se a potência gerada nas usinas, é necessário ter conhecimento do valor desta constante característica e da vazão disponível.

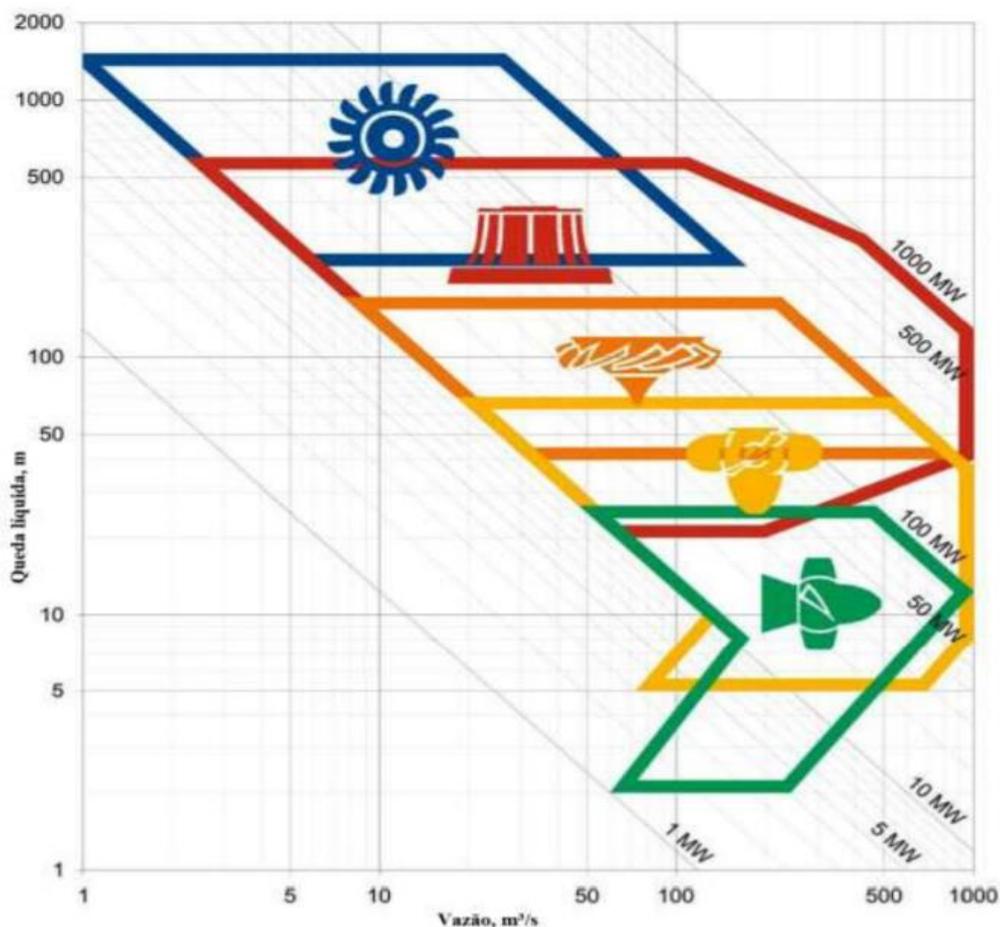
Analisando a equação (14), nota-se que ao aumentar a vazão turbinada, proporcionalmente também se aumenta a energia produzida. Todavia, da mesma forma, este aumento gera uma maior perda hidráulica no conduto. Então, conclui-se que não necessariamente quando se turbinava a máxima vazão disponível, se obtêm a melhor eficiência da turbina.

3.5 SELEÇÃO DO TIPO DE TURBINA

Cada Central Hidrelétrica possui particularidades que a difere das outras. Assim, a cada novo empreendimento é inevitável à realização de um estudo levantando as características da usina, principalmente para a seleção do tipo de turbina hidráulica que será instalada. Existem diversos tipos de turbinas disponíveis, e dependendo das especificações encontradas, uma turbina se emprega melhor que a outra.

Sabendo a altura da queda líquida e a vazão de água que passará pela turbina poderá ser submetida, normalmente recorre-se aos gráficos comparativos para definir qual melhor se enquadra nas duas especificações para então escolher a turbina, como pode ser visto no Gráfico 5 a baixo.

Gráfico 5 – Campo de Aplicação Típico das Principais Turbinas Hidráulicas



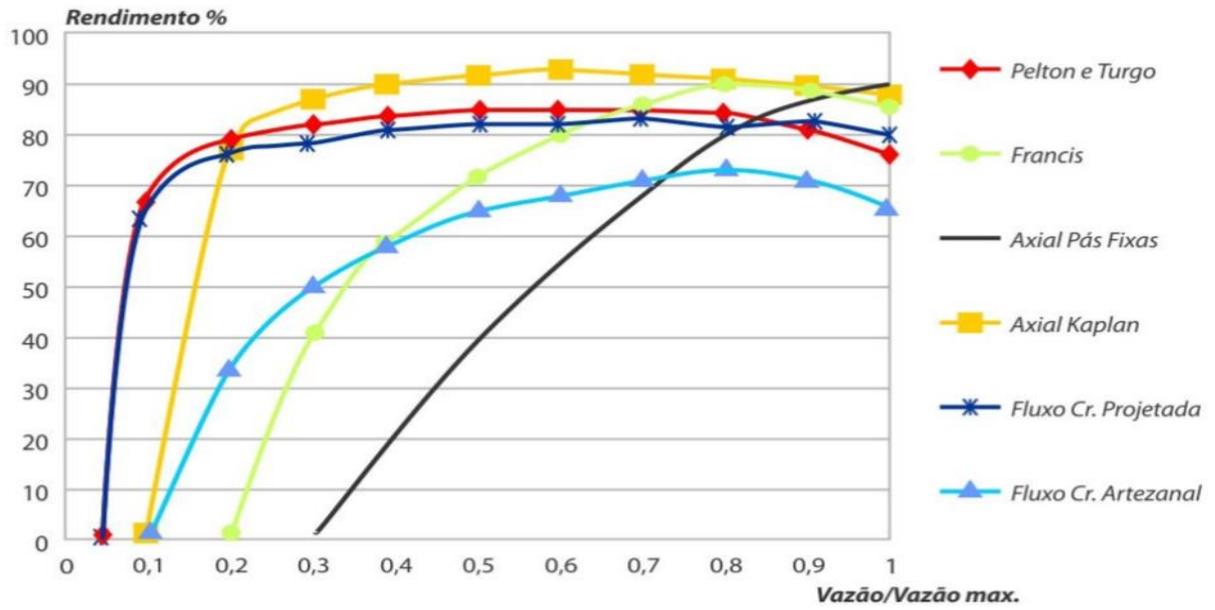
Fonte: Moraes (2011)

3.6 RENDIMENTO DA TURBINA

O rendimento hidráulico da turbina é a eficiência com que é transferida a potência disponível na água que flui através da turbina para o eixo do rotor. Logo, podemos analisar que uma parte da potência disponível no eixo da turbina hidráulica é dissipada em perdas, e assim, para diferentes condições de operação, a turbina irá apresentar uma diferente quantidade de perda.

No Gráfico 6 são comparados os desempenhos de algumas turbinas hidráulicas utilizadas no sistema brasileiro, levando em conta seu rendimento, variações de vazão e a altura constante.

Gráfico 6 – Rendimento com Diferentes Tipos de Turbinas e Variação de Vazão



Fonte: Miranda (2009)

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO

Serão apresentados e discutidos os dados acerca da metodologia apresentada, levando em consideração a população da região do Madeira e adjacentes as quais serão estudadas, além da aplicação dos cálculos para o dimensionamento das turbinas, a potência a ser gerada e o possível retorno energético para o estado.

Com os dados da Tabela 6 e tirando uma porcentagem da população rural que vive na mesorregião sul do estado, necessitaria de uma central hidrelétrica de média potência, gerando no mínimo 29MW se a instalação fosse ser distribuída para toda a região, um investimento maior em obras, desníveis e desmatamento. Buscando uma solução de PCH atender cada comunidade, dividindo-as em grupos geradores para atender as comunidades próximas, dimensionando de acordo com a quantidade da população a ser atendida e buscando um menor impacto para as regiões.

Tabela 6 – Definição de Instalação para cada Município.

MUNICÍPIO	POPULAÇÃO	LOCAL DE INSTALAÇÃO	POTÊNCIA
APUÍ	22 359 hab.	Rio Aripuanã	3MW
BORBA	41 748 hab.	Rio Madeira	6MW
HUMAITÁ	56 144 hab.	Rio Madeira	8MW
MANICORÉ	56 583 hab.	Rio Madeira	8MW
NOVO ARIPUANÃ	26 046 hab.	Rio Aripuanã e Rio Madeira	4MW

Fonte: Próprio Autor (2020)

Assim como na região no estado de RO, onde foram implantadas as duas UHE, Jirau e Santo Antônio, o rio madeira mostrou um grande potencial para gerar energia, diminuir as áreas alagadas e aproveitar os recursos hídricos da região, pela escolha de turbinas Bulbo. No entanto ainda houveram problemas ambientais e sociais com a diminuição de peixes na região de instalação das barragens e degradação da vegetação.

Com a exceção de Apuí que não é banhado diretamente pelo rio madeira, mas faz parte da microrregião do Madeira. Foi aferido a potência necessária para o município, porém não será

levado em consideração cálculos mais específicos de dimensionamento da turbina bulbo porque as características hidrodinâmicas do Rio Aripuanã se divergem do Rio Madeira.

Por se tratar do mesmo rio que move a hidrelétrica de Jirau e Santo Antônio, as variáveis características da água que foram consideradas para essas usinas serão utilizadas nesse trabalho. Considerando o grande volume do Rio Madeira e sua característica as baixas quedas, relacionando com o Gráfico 5, a utilização da turbina Bulbo seria a ideal pois, é capaz de gerar a potência desejada e trabalhar com as características do Rio Madeira, além de dar sequência ao montante de centrais que se encontra em RO e a corrente que desagua no Rio Amazonas.

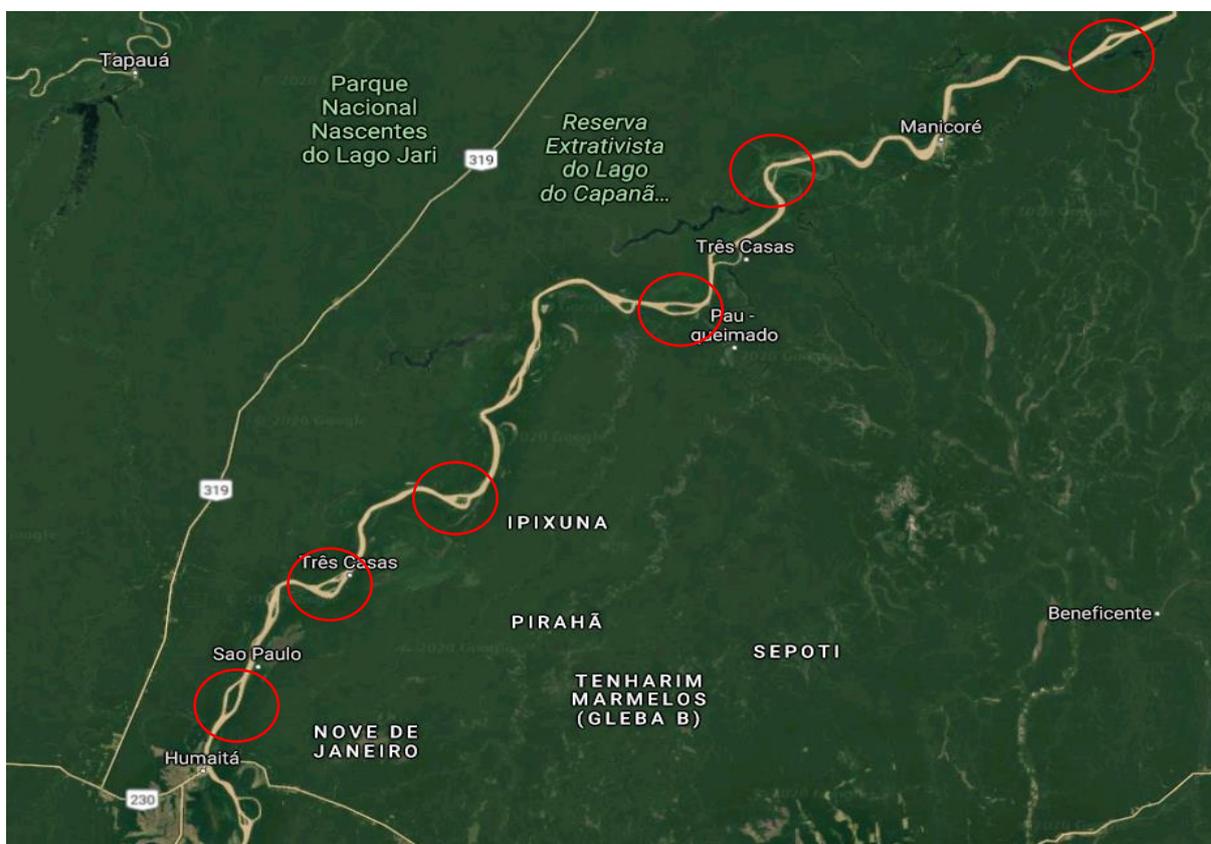
Utilizando os dados da UHE de Santo Antônio, consegue-se aferir a relação entre a vazão turbulência e vazão máxima, para definir rendimento que a turbina Bulbo proporcionaria, dessa forma a divisão entre as vazões gera uma razão aproximada de 0,5 que ao relacionar com o Gráfico 6, pode-se dizer que o rendimento da turbina Bulbo é cerca de 92%. Assim como a fórmula (12) descreve e utiliza os dados da Hidrelétrica de Santo Antônio, pode-se considerar que o gerador tem um rendimento na ordem de 70% e um $q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.1 ÁREA DE INSTALAÇÃO

Os rios na região Amazônica são característicos pelos diversos meandros encontrados em sua extensão e próximo dos municípios, na microrregião da madeira essa característica pode ser vista na figura 12. Esses meandros podem ser utilizados como artifícios que facilitem a instalação das usinas sem prejudicar de forma progressiva e em grande escala a via de transporte de muitas comunidades, assim como a passagem de peixes e conseqüentemente a pesca na região.

Outra importante característica a se levar em consideração são as temporadas de seca e cheia do rio, tratando-se de uma PCH sem barragem a Fio D'água, a variação de grandes volumes pode atrapalhar na geração de energia necessária para a região. Por esse motivo, deve-se levar em consideração a construção de pequenas barragens para manter uma vazão contínua que passará pelo rotor da turbina bulbo.

Figura 12 – Meandros entre os Municípios de Manicoré e Humaitá



Fonte: Google Maps

Sendo assim, utilizando a fórmula (14) para montar a equação, e considerando os dados já apresentados, chega-se ao resultado:

Tabela 7 – Características dos Reservatórios		
MUNICÍPIOS	RESERVATÓRIO	ALTURA
BORBA	Fio D'agua	7 metros
HUMAITÁ	Fio D'agua	9 metros
MANICORÉ	Fio D'agua	9 metros
NOVO ARIPUANÃ	Fio D'agua	6 metros
Fonte: Próprio Autor		

Outra característica importante e útil é a possibilidade de aumentar a quantidade de turbinas instaladas para atender a uma quantidade maior de pessoas, utilizando a estrutura já construída e incrementando a quantidade de modelos bulbo a serem instalados, porém também tornaria o projeto com alto custo e inviabilizaria o mesmo, pois dentre as turbinas hidráulicas mais conhecidas, a Bulbo é a que acarreta maior investimento, pelo seu sistema ser acoplado dentro da estrutura física e exigir tecnologias mais sofisticadas para a sua instalação.

4.2 DESENVOLVIMENTO PARA A REGIÃO

A instalação da PCH proporcionará um grande desenvolvimento para a região, a utilização de um sistema potente e com energia segura e constante traz confiabilidade a investidores e indústrias que se interessarem na região e possam investir na mesma. A construção de uma estrutura hidrelétrica, mesmo que uma PCH por si só, já alavanca a economia da região pela movimentação de maquinário, mão de obra, infraestrutura e manutenção da estrutura.

Proporcionar energia de qualidade e que abasteça a população traz ganhos a pequeno, médio e longo prazo, pois garante saúde, auxilia na educação e economia da região, aumentando o desenvolvimento e crescendo os setores agropecuários e extrativistas que são as principais fontes de renda cidades e comunidades próximas, os quais são pontos de grande movimentação da economia na região e muitas vezes se encontram limitando sua produção pela baixa energia que é produzida.

4.3 ENERGIA LIMPA E SUSTENTÁVEL

A energia do Amazonas, como já foi comentado, tem sua matriz advinda de fontes térmicas em sua maioria, devido à facilidade de instalação e ser uma fonte de utilização costumeira, a prática se alastrou de tal forma que anualmente centenas de concessões já foram liberadas e mais instalações são projetadas.

A utilização da PCH não só diminuiria a dependência do estado nas termelétricas, como também reduziria custo, já que as usinas térmicas, seja a gás ou óleo diesel, são mais suscetíveis a manutenção e precisam ser reabastecidas com combustível, o que gera mais custos com o transporte e abastecimento. Além da poluição causada pela queima do combustível fóssil, onde o mundo busca cada vez mais diminuir a emissão de CO₂ e procurar tecnologias mais limpas.

Gráfico 7 – Custos de Produção de Energia Elétrica no Brasil

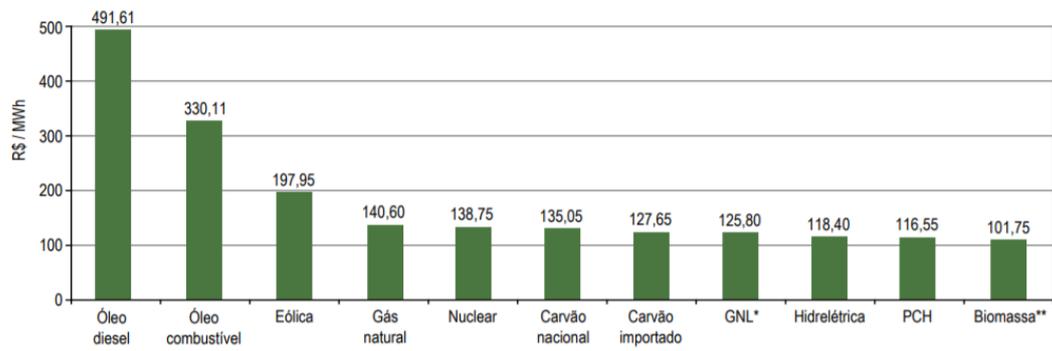


Gráfico 1.2 – Custos de produção de energia elétrica no Brasil.

(*) Gás natural liquefeito
(**) Bagaço de cana
Fonte: PSR, 2008 (adaptado).

Fonte: ANEEL (2008)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados apresentados nesse trabalho, conclui-se que:

A matriz energética no estado do Amazonas vem crescendo cada vez mais com a utilização de fontes térmicas para gerar energia. A utilização de Centrais Hidrelétricas na região amazônica já se mostrou promissora com as duas UHE instaladas em Rondônia e a turbina Bulbo apresenta cada vez maior eficiência e menor impacto ambiental.

Com os dados mostrados, pode-se perceber que a possibilidade de instalação é viável, já que na mesma região e rio, foram instaladas duas usinas de grande porte e o Amazonas carece de fontes alternativas e renováveis em sua matriz energética.

Mesmo os municípios no Amazonas serem distantes e exigirem grandes investimentos para alcançá-los, a ligação de todos os estados pelo SIN permitirá maior controle do sistema energético no país e futuramente poderá ser aproveitado para novas instalações de CH na região, pensando no gigantesco potencial hidráulico da bacia amazônica.

Por fim, espera-se que com esses levantamentos bibliográficos e resultados, possa-se iniciar uma discussão mais ativa na instalação de centrais hidrelétricas no Amazonas e renovar a matriz energética do estado.

6. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Luciane. **Ipaam licencia usinas termelétricas do interior do estado**. Rede Amazônica. Disponível em: <<https://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2020/01/17/ipaam-licencia-usinas-termeletricas-do-interior-do-estado.ghhtml>> acesso em: 10 de Junho de 2020.

ALSTON BRASIL. **Turbinas hidráulicas**. São Paulo, 2008.

AMAZONAS ENERGIA. **Relatório da Administração 2019**, Amazonas: Manaus, 2019. Disponível em: <<http://www.amazonasenergia.com/cms/wpcontent/uploads/2016/>> acesso em: 04 de junho de 2020.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica no Brasil**. 3ª ed. Brasília, 2008.

BRASIL. Governo Federal. **Fontes de energia renováveis representam 83% da matriz elétrica brasileira**. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/01/fontes-de-energia-renovaveis-representam-83-da-matriz-eletricabrasileira>> acesso em: 01 de junho de 2020.

BRASIL (2009). MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. ISAURA MARIA DE RESENDE LOPES FRONDIZI. (Org.). **O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo: Guia de Orientação 2009**. Rio de Janeiro, 2009.

CARVALHO, J.F., SAUER, I.L. **Amazônia, Energia Elétrica e Sustentabilidade**. Valor Econômico, 2010. disponível em: < <https://www.bracier.org.br/noticias/brasil/1906-amazonia-energia-eletrica-e-sustentabilidade.html>.> acesso em: 25 de fevereiro de 2020

ELETROBRÁS. **Potencial hidrelétrico brasileiro em cada estágio do Estado**. Disponível em:< <https://eletrobras.com/pt/AreasdeAtuacao/geracao/sipot/>> Acesso em 14 de junho de 2020.

ENCINA, Anastacio Sebatían Arce. **Despacho ótimo de unidades geradoras em sistemas hidrelétricos via heurística baseada em relaxação langrangeana e programação dinâmica**. Universidade Estadual de Campinas. UNICAMP: Campinas, 2006.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2018**. Rio de Janeiro, 2018.

FERREIRA, S.M.P., BOTELHO, L. **O emprego industrial na Região Norte: O caso do Polo Industrial de Manaus**. Estudos Avançados 28 (81), 2014. p.141-154.

FURNAS - Centrais Elétricas S.A. **Usinas Hidrelétricas**. IBAMA-DF, 2010.

HITACHI, 2006. **Hitachi Hydroelectric Equipament**. Catálogo.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2019**. Brasília, 2019.

MARQUES, Gil da Costa. **Turbina Pelton**. São Paulo: Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada, São Paulo: São Paulo, 1999. Disponível em: <<http://www.cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo2B/Hidraulica/turbina3.htm>> Acesso em: 14 de julho de 2020.

MIRANDA, Roberto Lobo. **Regulação técnica para se obter melhor eficiência na motorização de pequenas centrais hidrelétricas no Brasil**. Universidade de Salvador. Bahia: Salvador, 2009.

REIS, Lineu Belico dos. **Geração de energia elétrica**. 2ª ed. São Paulo: Barueri, 2011.

ROSA, L.P. **Geração hidrelétrica, termelétrica e nuclear**. Estudos Avançados. São Paulo, 2007.

SANTOS, Marcel Silva Carvalho dos. **Modelagem dinâmica de turbinas hidráulicas axiais de dupla regulação para estudos de estabilidade angular transitória em sistemas elétricos de potência**. Universidade Federal de Itajubá. Minas Gerais: Itajubá, 2012.

SOUZA, R.C.R. **ECOGERMA - Energia renovável e eficiência energética**. Amazonas: Manaus, 2014. disponível em: <http://www.ahkbrasilien.com.br/fileadmin/ahk_brasilien/portugiesische_seite/departamentos/cooperacao_e_desenvolvimento/ecogerma_manau/marktstudien_portugiesisch/amazonas_energia_renovavel_e_eficiencia_energetica.pdf> acesso em: 29 de agosto de 2020

SOUZA, Z., **Dimensionamento de Máquinas de Fluxo – Turbinas – Bombas - Ventiladores**. 1ª ed. São Paulo, 1991.