

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

GUILHERME HENRIQUE SCHULZ

PROJETO DE MICROCENTRAL HIDRELÉTRICA EM UNIDADE RURAL

JOINVILLE

2019

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

GUILHERME HENRIQUE SCHULZ

PROJETO DE MICROCENTRAL HIDRELÉTRICA EM UNIDADE RURAL

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Bacharelado em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, para a obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Jackson May Dezuo

Coorientador: Prof. Dr. Fernando Buzzulini Prioste

JOINVILLE

2019

RESUMO

Atualmente o cenário energético mundial foca para as formas de geração de energia sustentáveis e ecologicamente corretas. Contudo, devido à escassez de grandes recursos, espaço e aos impactos ambientais que maiores instalações causam à sociedade e ao meio ambiente, a microgeração distribuída ganhou maior enfoque como possível solução a demanda energética. Dentro das opções de microgeração, a energia solar se encontra muito bem consolidada como principal alternativa ao consumidor, principalmente em áreas de maior incidência solar. Todavia, busca-se por meio deste trabalho elaborar um estudo teórico e prático, através de revisão bibliográfica, simulações e da montagem de protótipo, que permita avaliar a microgeração de energia elétrica através de recursos hídricos encontrados em uma unidade rural, afim de buscar uma alternativa de microgeração distribuída para unidades consumidoras fora de centros urbanos, que procuram a redução do consumo de energia proveniente da concessionária ou que se encontram sem acesso aos meios de distribuição de energia elétrica convencionais.

Palavras-chave: Energia renovável. Microgeração hidrelétrica. Geração distribuída.

LISTA DE FIGURAS

1.1	Estrutura geral das cadeias energéticas.	11
1.2	Geração de eletricidade por tipo de combustível (em TWh) de 1971 a 2010.	12
1.3	Consumo energético mundial de 1990 até 2040.	13
1.4	Consumo energético mundial por tipo de combustível de 1990 até 2040.	14
1.5	Geração mundial de eletricidade por tipo de combustível, de 2010 a 2040.	15
1.6	Produção primária de energia no Brasil.	17
1.7	Evolução da capacidade de armazenamento do SIN.	19
1.8	Instalação de microcentral em Três Coroas	27
1.9	Estrutura dos componentes para micro e minicentraís hidrelétricas	28
1.10	Roda d'água cubas de cima	35
1.11	Roda d'água cubas de baixo	36
1.12	Seção transversal de uma Turbina Pelton	38
1.13	Bico injetor e diâmetro do jato de uma Turbina Pelton	39
1.14	Rendimento das turbinas para microcentrais hidrelétricas	40
1.15	Estimativa dimensões da Turbina Francis	41

LISTA DE TABELAS

1.1	Categorização de usinas hidrelétricas por potência e altura	21
1.2	Unidade geradora utilizada na microcentral hidrelétrica do município de Três	
	Coroas (RS)	28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CCT	Centro de Ciências Tecnológicas
DEE	Departamento de Engenharia Elétrica
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
EPE	Empresa de Pesquisas Energéticas
FCU	Fator de Capacidade
IASC	Instituto de águas de Santa Catarina
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços
NR	Norma Regulamentadora
OCDE	Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PVC	Policloreto de Vinila
RV	Regulador de Velocidade
SIN	Sistema Interligado Nacional
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UDESC	Universidade do Estado de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

$\cos \phi$	Fator de potência
η	Rendimento
η_{TOT}	Rendimento Total
ρ_a	Densidade da água
A_s	Área da secção
D_c	Diâmetro de coroa
D_e	Diâmetro econômico
d_j	Diâmetro de jato
E_e	Energia Elétrica
g	Gravidade
H_h	Altura
H_r	Altura de recalque
h_s	Sobrepresão hidráulica
H_t	Carga hidráulica
n_e	Rotação efetiva
n_s	Rotação específica
P_e	Potência Elétrica
p_e	Pressão
P_m	Potência mecânica
Q_b	Vazão na bomba
Q_v	Vazão
V_e	Velocidade de escoamento
fp	Fator de potência

SUMÁRIO

1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
1.1	GERAÇÃO ENERGÉTICA MUNDIAL	10
1.1.1	Matriz energética mundial	12
1.1.2	Matriz energética brasileira	16
1.2	GERAÇÃO HIDRELÉTRICA BRASILEIRA	17
1.2.1	Usinas hidrelétricas	20
1.3	MICROCENTRAIS HIDRELÉTRICAS	22
1.3.1	Legislação	24
1.3.2	Meio Ambiente e Impacto Ambiental	25
1.4	PROJETO DE MICROCENTRAL HIDRELÉTRICA	27
1.4.1	Obras civis	29
1.4.1.1	Barragens	29
1.4.1.1.1	Barragem de terra	29
1.4.1.1.2	Barragem de Enrocamento	30
1.4.1.1.3	Barragem tipo gravidade	30
1.4.1.1.4	Barragem tipo misto	30
1.4.1.2	Projetos Hídricos	30
1.4.1.2.1	Conduto forçado	30
1.4.1.2.1.1	Diâmetro econômico	31
1.4.1.2.1.2	Velocidade do líquido	32
1.4.1.2.2	Vertedouro ou Extravasador	32
1.4.1.2.3	Tomada de água e condutos adutores	33
1.4.1.2.4	Câmaras de carga	33
1.4.1.2.5	Chaminé de equilíbrio	33
1.4.1.2.6	Golpe de aríete	33
1.4.1.2.7	Canais de fuga	34
1.4.1.2.8	Caracol/Caixa Espiral	34
1.4.2	Máquinas hidráulicas	34
1.4.2.1	Rodas d'água	35
1.4.2.1.1	Roda d'água cubas de cima	35
1.4.2.1.2	Roda d'água cubas de baixo	36

1.4.2.2	Turbinas	37
1.4.2.2.1	Turbina Pelton	37
1.4.2.2.2	Turbina Francis	39
1.4.2.2.3	Bombas de água como turbinas	41
1.4.3	Unidades Geradoras	42
1.4.3.1	Geradores Síncronos	42
1.4.3.2	Reguladores de Velocidade	42
1.4.3.3	Volante de Inércia	43
2	HIPÓTESE	44
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 GERAÇÃO ENERGÉTICA MUNDIAL

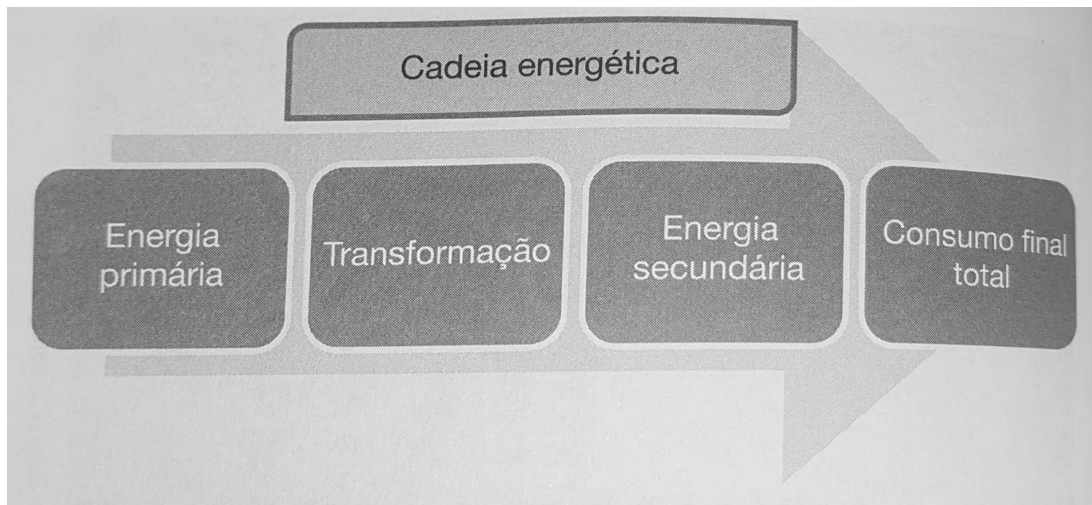
O sol é a principal fonte de energia de todo o planeta. Moreira (2017) cita a necessidade que todos os processos climáticos naturais, assim como a sobrevivência da vida, têm para com a fonte energética sol. A partir dela é possível a manutenção de toda forma de energia necessária para o ser humano, uma vez que é esta mesma estrela que mantém os ciclos da água e dos ventos e provém calor e luz para a sobrevivência vegetal e animal.

O conceito de energia é de difícil entendimento já que se trata de uma grandeza que provem de outros dois sistemas físicos. O significado da palavra energia vem do grego e é traduzida como “a capacidade de gerar trabalho”. Esta mesma energia pode ser transformada em diferentes formas, contudo a energia contida em um sistema nunca se altera (primeira lei da termodinâmica). (MOREIRA, 2017).

Ainda para Moreira (2017) o fluxo de energia elétrica da sua fonte até a utilização final pode ser representado em uma cadeia energética, cujas etapas são:

- Energia Primária: entendida como a energia em sua matéria prima. Como exemplos podem ser citados: carvão mineral, petróleo, gás natural, urânio, água, ventos entre outros. A partir da fonte primária se obtém a maior parte de toda energia consumida no mundo.
- Transformação: Transformação é a etapa responsável por extrair a energia em sua forma primária e leva-la para seu formato de utilização. Neste *hall* estão incluídas as centrais geradoras hidrelétricas, as plantas de beneficiamento de petróleo, as geradoras termelétricas e afins.
- Energia secundária: Etapa conhecida por conter os produtos da energia primária que passaram pela etapa de transformação. Dentro deste grupo pode-se encontrar o óleo diesel, a gasolina, urânio enriquecido e até mesmo a eletricidade.
- Consumo final total: Etapa final da cadeia onde ocorre a utilização destes produtos para fins industriais ou residenciais, diretamente com os inúmeros tipos de consumidores.

Figura 1.1 – Estrutura geral das cadeias energéticas.



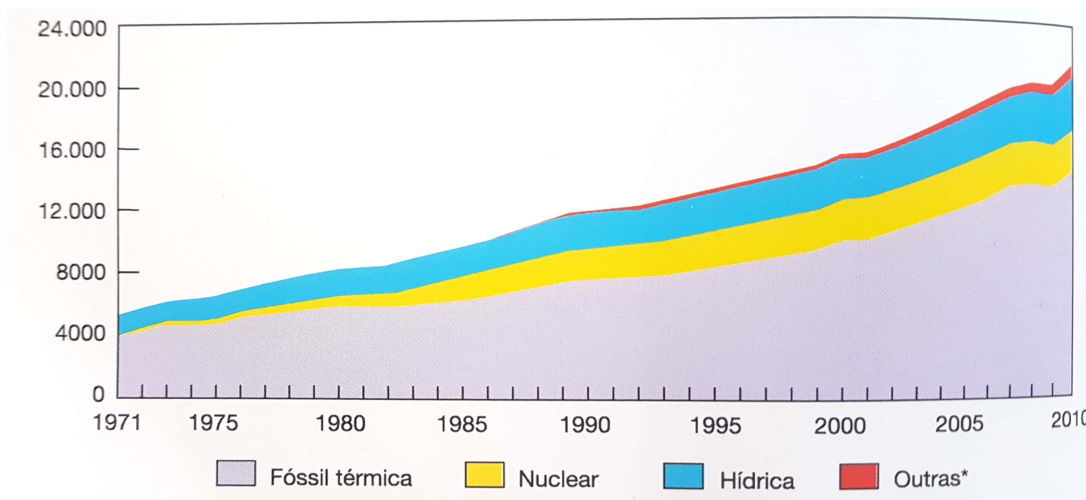
Fonte:(MOREIRA, 2017)

A matriz energética é um indicador/panorama que informa o aproveitamento energético de recursos em regiões, países ou do mundo inteiro. O balanço energético depende desta informação e a evolução do sistema elétrico mundial depende do entendimento e do planejamento a partir destes dados.

A matriz energética é criada tendo como base o período de um ano e uma análise de cenário específico. Ela ainda pode propor como deve ser o desenvolvimento energético para uma dada região. A construção destes dados é feita levando-se em conta toda a matriz consumidora, como indústrias, serviços e consumidores residenciais, e também com o levantamento dos principais centros transformadores de energia.(MOREIRA, 2017)

Segundo Pinto (2018), existem três principais formas de geração de energia elétrica com destaque no mundo: Fóssil, Hídrica e Nuclear. Durante os anos de 1971 a 2010 houve uma tendência de diminuição da matriz fóssil e um crescimento hídrico e nuclear. Contudo o que se observa predominante é o crescimento de uma quarta matriz energética: as renováveis. Este crescimento está atrelado a vantagens econômicas, fiscais e tecnológicas, que proporcionam a viabilidade de implementação de novas fontes energéticas sobre as tradicionais usinas a vapor com combustível fóssil.

Figura 1.2 – Geração de eletricidade por tipo de combustível (em TWh) de 1971 a 2010.



Fonte: (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2012; PINTO, 2018)

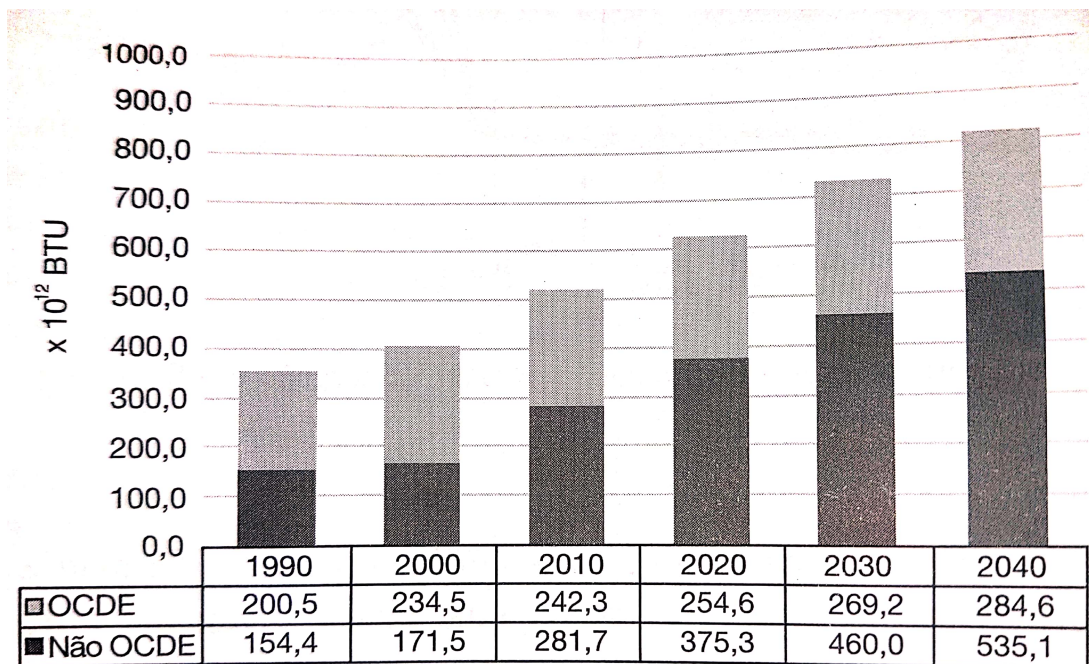
Existe uma conexão essencial do desenvolvimento humano com seu consumo energético. Melhorias nas condições de vida garantem maior acesso à informação, higiene e bens de consumo. Atrrelados a estes está a necessidade de produção elétrica para atendimento de comércios, residências e industriais. O objetivo de sistemas de potência é o de fornecer energia elétrica a centros consumidores através da correta alocação de unidades geradoras. Estas mesmas unidades devem cumprir normas a garantir a segurança, o desenvolvimento social e o bem-estar ecológico, equilibrado com a necessidade de produção energética. (PINTO, 2018).

1.1.1 Matriz energética mundial

"[...] o traçado da matriz energética é resultado dos trabalhos do balanço energético consolidado, o qual, nesse sentido, mostra as inter-relações entre oferta, a transformação e o uso final de energia, cujo foco principal é o planejamento energético. Assim a matriz energética é o resultado dos fluxos energéticos das fontes primárias e secundárias de energia, desde a produção até o consumo final". (MOREIRA, 2017, p. 7).

Com a análise da figura 1.3 de Moreira (2017) percebe-se um grande aumento do consumo energético dos países não membros da OCDE enquanto que para os membros do grupo o crescimento foi mais tênue. O que indica um desenvolvimento de países emergentes que necessitam de maior demanda energética para garantir o fornecimento energético necessário à indústria e ao consumo.

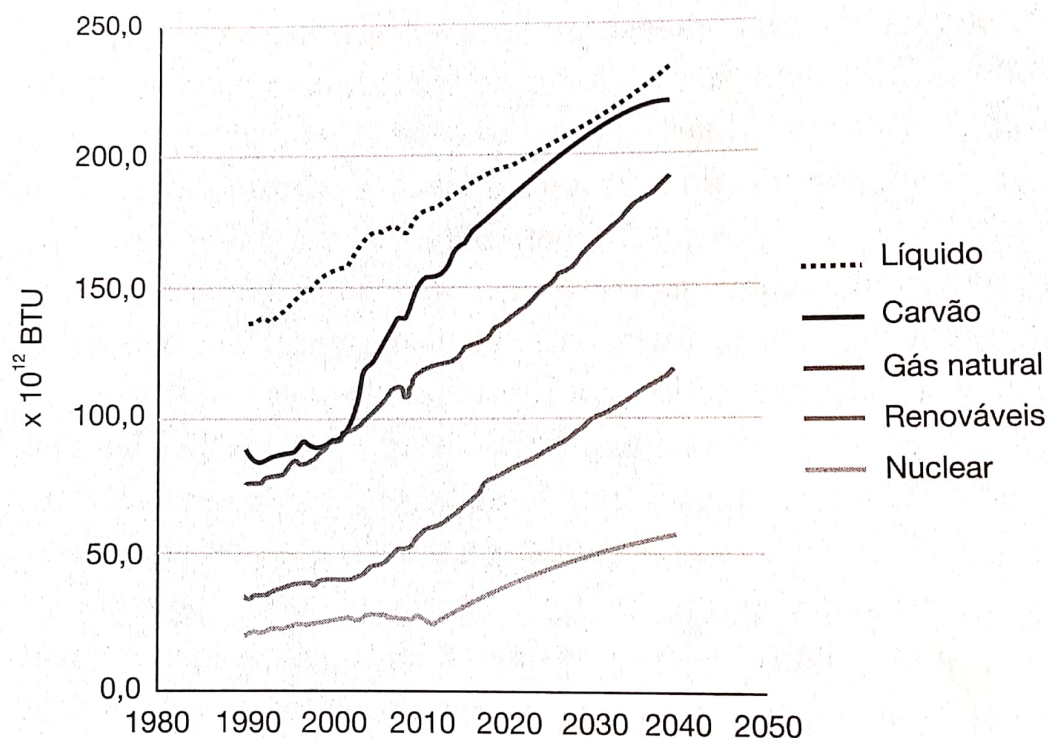
Figura 1.3 – Consumo energético mundial de 1990 até 2040.



Fonte:(INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2013; MOREIRA, 2017)

A figura 2.4 (MOREIRA, 2017) mostra que mesmo com os esforços de desenvolvimento das matrizes energéticas renováveis os combustíveis fósseis continuarão a fornecer energia à grande parte do mundo no futuro especulado, em especial porque a demanda cresce muito mais rapidamente do que a consolidação de novas formas de energia ou ao barateamento de gerações mais limpas. Mesmo assim pode-se perceber o acentuado crescimento das energias renováveis (que já vem sendo incentivadas por muitos países, em especial pela microgeração) e o crescimento já não tão expressivo da energia nuclear que sofre com os receios sobre sua segurança frente ao histórico de acidentes passados.

Figura 1.4 – Consumo energético mundial por tipo de combustível de 1990 até 2040.

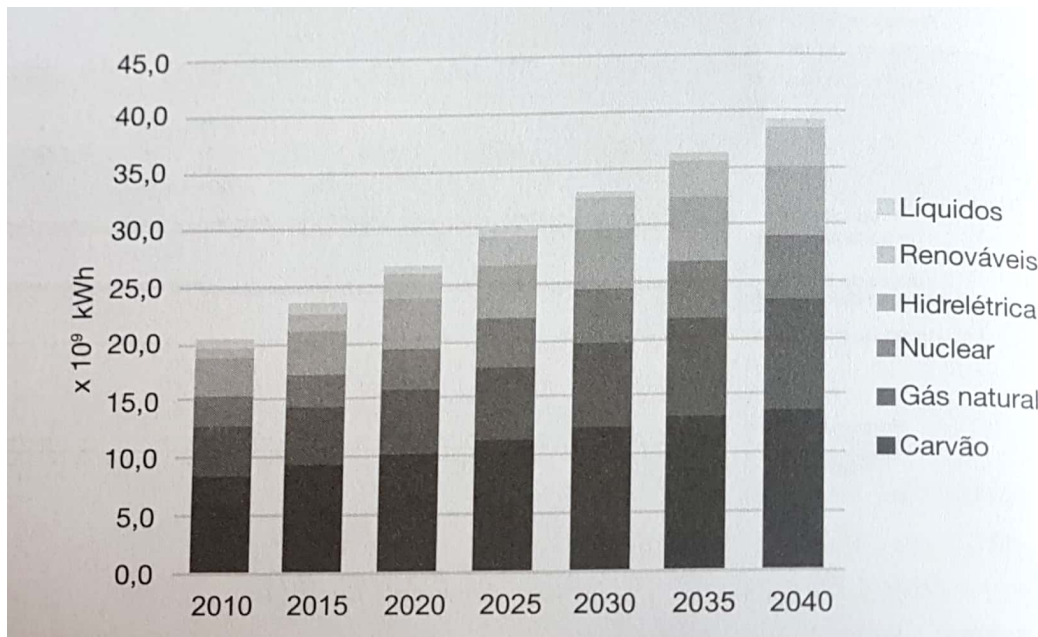


Fonte: (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2013; MOREIRA, 2017)

Finalmente com a figura 1.5 (MOREIRA, 2017) pode-se aproximar uma tendência de crescimento e analisar que a geração líquida de eletricidade mundial passará de pouco mais de 20 TWh em 2010 para mais de 39 TWh em 2040. Conforme mostrado na figura 1.3 este crescimento se dará de forma mais gradual para os membros da OCDE que possuem um mercado energético mais consolidado e maduro. Enquanto que para os não membros da organização este crescimento será mais abrupto por razão de mais pessoas estarem tendo acesso a energia elétrica.

Com o aumento da preocupação ambiental e de segurança de abastecimento alguns países tem estimulado políticas de incentivo ao uso de formas de obtenção de energia elétrica que fujam dos convencionais combustíveis fósseis. Devido a estas medidas adotadas percebe-se, e estima-se, que as fonte renováveis, seguidas de gás natural e energia nuclear, são as formas de obtenção de energia que mais apresentam tendência de crescimento, como pode ser observado na figura 1.5. Também é possível avaliar que a energia hidrelétrica apresenta um certo crescimento na perspectiva futura, e a produzida a partir de recursos fósseis apresenta grande estagnação.

Figura 1.5 – Geração mundial de eletricidade por tipo de combustível, de 2010 a 2040.



Fonte: (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2013; MOREIRA, 2017)

Para Moreira (2017) grande parte de todo este aumento na demanda energética será suprida em sua maioria pela energia hidrelétrica, solar e eólica. Mais precisamente o autor menciona que dos estimados 5,4 TWh de aumento na produção energética via geração por fontes renováveis, 52% destes serão advindos da geração hidrelétrica em virtude, principalmente, dos não membros da OCDE. Mesmo com o altíssimo custo envolvido com a construção de unidades hidrelétricas de geração, as fontes solar e eólica ainda enfrentam entraves tecnológicos devido a sua não constante produção, podendo não estar disponível quando o sistema necessitar. Mesmo assim, tem-se grandes perspectivas com estas tecnologias de geração devido aos desenvolvimentos tecnológicos recentes que cada vez mais viabilizam a utilização de fontes alternativas de energia.

O estudo de uma matriz energética é vasto e complexo, uma vez que a energia elétrica já é um bem básico. Desta forma, o crescimento energético no consumo de uma nação está atrelado com o seu desenvolvimento. Portanto, as diferentes formas de geração e os investimentos feitos para diversificação da produção podem dizer muito sobre um país, além do âmbito da energia elétrica. Dessa forma é muito importante o uso do estudo da matriz energética para garantir um desenvolvimento sustentável, onde garanta-se o crescimento social e a preservação ambiental.

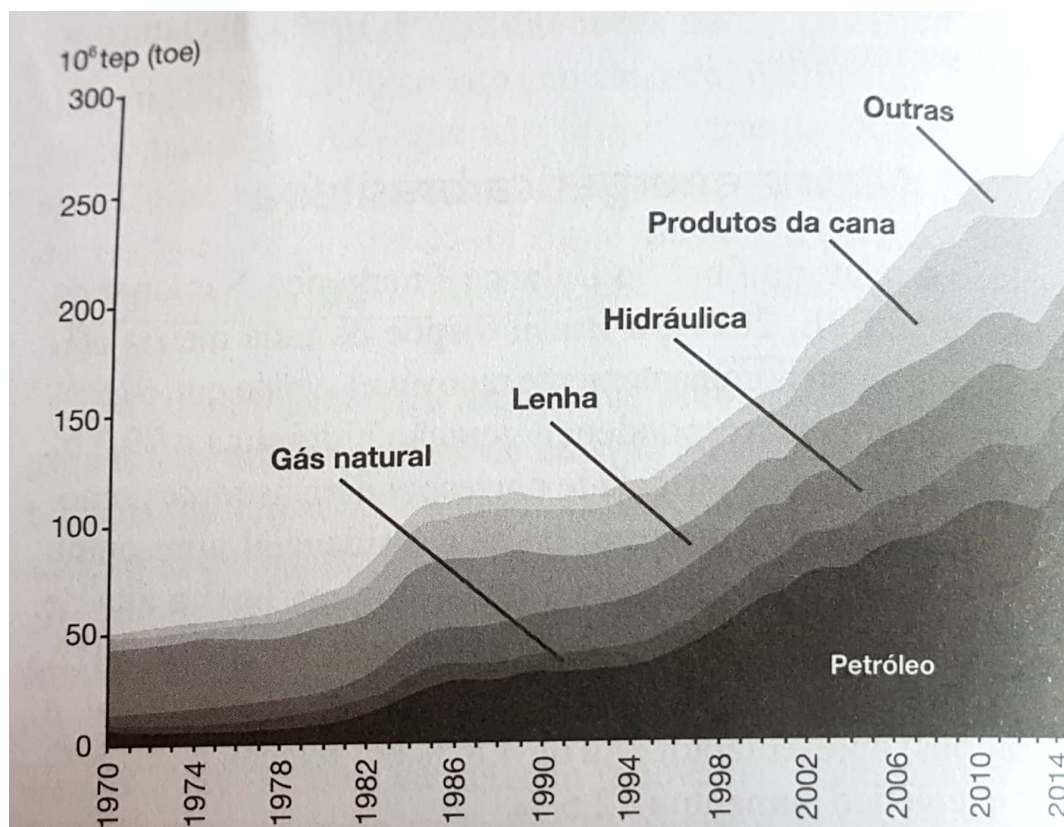
1.1.2 Matriz energética brasileira

Focando os estudos para o setor energético brasileiro, percebe-se que o Brasil está alocado como um país de predominância das energia renováveis. Segundo Moreira (2017) aproximadamente 65% da energia brasileira é produzida por fontes renováveis sendo desta quantia quase 79% provenientes de geração hidráulica de energia. Se for analisado o histórico brasileiro com os últimos relatórios recentes, é possível perceber algumas características sobre sua matriz energética: dentro das componentes de consumo elétrico no Brasil, as residências apresentam um leve crescimento, muito provavelmente devido ao crescimento populacional; as indústrias se mostram estagnadas na demanda energética, predominantemente pela forte crise em que o país esteve imerso; e os demais setores mostram crescimento em consumo. Petróleo e derivados tiveram queda na extração, contudo seus derivados tiveram aumento nas produções. Óleo diesel teve relativo crescimento enquanto a gasolina apresentou queda no consumo. O carvão vapor, tipologia utilizada para geração de energia elétrica, apresentou aumento na demanda.

Com respeito ao que se observa na figura 1.6, Moreira (2017) faz algumas observações:

- a energia eólica apresenta um grande crescimento, 77% no ano de 2015.
- o biodiesel tem aumentado no consumo brasileiro, 15% para 2015.
- a geração de energia elétrica brasileira em 2015 apresentou uma queda de 1,5% em relação ao ano anterior, sendo que a dominante fonte geradora ainda é a hidráulica, contudo esta apresentou uma queda de 3,7% no mesmo ano.
- o consumo brasileiro foi menor do que em 2014, 1,8% menor.

Figura 1.6 – Produção primária de energia no Brasil.



Fonte: (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME), 2016; MOREIRA, 2017)

Algumas perguntas se formam com a análise do panorama energético brasileiro, questionamentos que visam a conscientização sobre as formas de energia utilizadas no país. Como poderá ser assegurado o fornecimento de energia para uma população cada vez maior e quais os impactos que estes aumentos na demanda provocarão para a sustentabilidade das futuras gerações? A utilização de relatórios emitidos periodicamente podem auxiliar no estudo do desenvolvimento energético brasileiro, enquanto que pesquisas e investimentos ajudam na proliferação de novas tecnologias que venham a substituir fontes tradicionais, e não sustentáveis, de energia.

1.2 GERAÇÃO HIDRELÉTRICA BRASILEIRA

"A energia hidrelétrica é umas das melhores, mais baratas e limpas fontes de energia". (PINTO, 2018). A primeira aparição da energia hidrelétrica tem registros, segundo Pinto (2018), em 1879 quando a primeira usina hidrelétrica foi instalada juntamente às quedas das Cataratas do Niágara, servindo para alimentar as lâmpadas da cidade de Niagara Falls no Canadá. O princípio que esta por trás desta iniciativa, que posteriormente se transformou numa das principais formas de geração de energia, é a de transformar a energia potencial da água (reservatório) em

energia cinética da água (vazão) e finalmente absorver deste movimento energia mecânica capaz de girar o conjunto turbina-gerador. Toda este simples princípio demanda de grandes instalações e sistemas para seu funcionamento, o que honera e torna custosa a instalação de uma usina hidrelétrica, contudo o tempo de vida útil desta é superior a muitas alternativas, viabilizando o sistema.

Segundo Pinto (2018) a eletricidade proveniente das águas já é muito consolidada, estando presente em 159 países e fornecendo 16,3% de toda energia global. Esta forma de geração desempenha um papel muito importante na matriz energética global, mas em especial a brasileira, onde participa com maior parte da parcela geradora.

A geração hidrelétrica de energia oferece algumas interessantes vantagens sobre outras formas concorrentes. Uma vez instalada seu custo de produção é baixo, o acionamento da máquinas geradoras é rápido e seguro, e muitas vezes, dependendo do espaço ocupado pelo reservatório, seu impacto ambiental pode ser menor do que o decorrente de geradoras termoe-létricas.

Contudo Moreira (2017) muito bem ressalta que existem impactos. O mesmos reservatórios das usinas hidrelétricas causam impactos proporcionais a seu tamanho, capacidade de geração e relevo da instalação. Por esta razão os locais com melhor razão aproveitamento energético e espaço inundado são utilizados prioritariamente, o que causa um entrave ambiental para futuras instalações que precisarão garantir o mínimo de impacto ambiental para regiões onde o relevo não favoreça o armazenamento hídrico.

Devido ao enorme potencial hídrico brasileiro, o Brasil tem a sua maior parte de produção de energia elétrica gerada por esse tipo de aproveitamento, sendo que, ao final da década de 90, quase 90% da potência gerada no Brasil vinha de geração hidrelétrica.(REIS, 2011)

Reis (2011) menciona que para os períodos anteriores aos anos 2000, a atratividade de custos e a falta de conscientização ambiental e social desaceleraram, ou até mesmo atrasaram, a evolução de pequenas centrais geradoras (mini e microcentrais incluídas). Atualmente, com a escassez de recursos e de espaço, o governo busca com medidas fiscais e programas de incentivo a proliferação da descentralização energética.

Segundo Moreira (2017) no Brasil somente cerca de 30% do potencial hidrelétrico foi inventariado, ou seja, possui aproveitamento de unidades geradoras. Isto ocorre devido a saturação de unidades geradoras nos ambientes mais propícios, onde o relevo ameniza impactos ambientais. Todo o restante de 70% sofre com o custo relativo a construção e licenciamento ambiental (custo marginal).

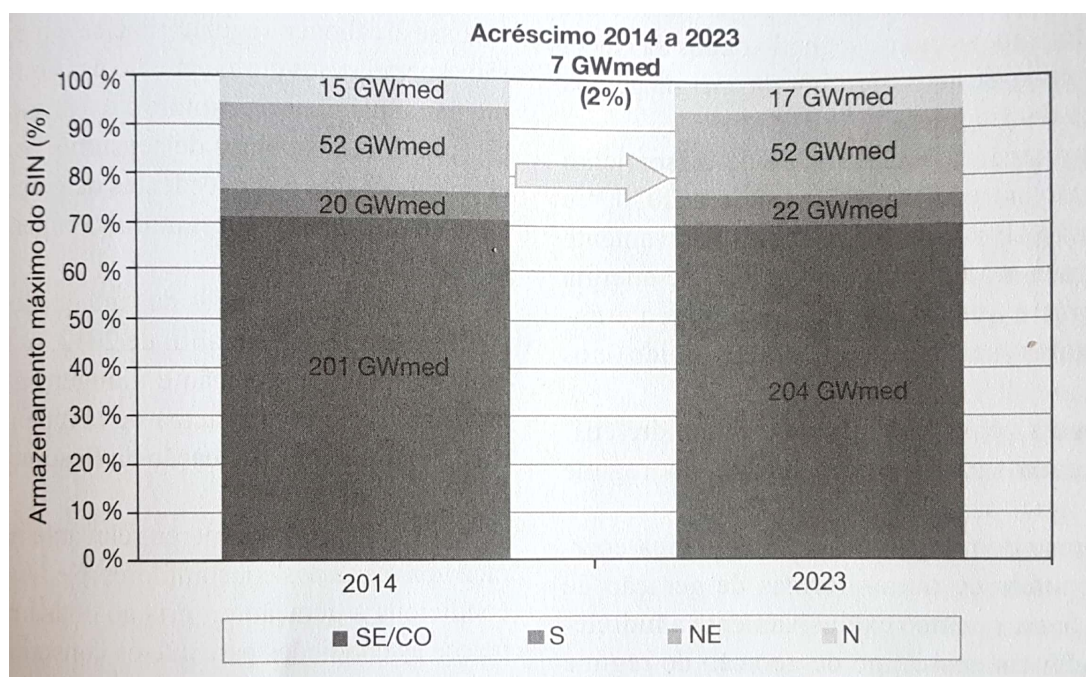
Ainda vale mencionar que destes 70% de potencial remanescente citados por Moreira (2017), 70% estão localizados nas bacias do Amazonas e do Tocantins, regiões de extrema necessidade de conservação e portanto de muitíssima dificuldade para licenciamento ambiental.

Este panorama atual brasileiro é o que mais mitiga as possibilidades futuras de desenvolvimento de grandes centrais geradoras hidrelétricas. Alternativas surgiram para tentar solucionar este problema, como por exemplo a elaboração de usinas hidrelétricas que não venham a necessitar de reservatórios (fio d'água). Contudo, mesmo sendo uma boa solução ambientalmente correta e de menor custo para implementação, estas mesmas usinas acabam por não apresentarem a mais importante das características de uma usina hidráulica para o sistema interligado: manter a geração de energia mesmo em temporadas de seca.

Decorrente desta mudança de postura, o SIN começou a sofrer em períodos de longa estiagem, uma vez que, as ainda presentes, usinas com grandes reservatórios não conseguem suportar a carga do sistema inteiro, e assim o Brasil volta a sofrer com o aumento de demanda que traz consigo a necessidade de religar as unidades geradoras termoeletricas, caras e muito mais poluentes.

Com o gráfico da figura 1.7 observa-se justamente esta tendência. O crescimento projetado no armazenamento de energia até 2030 é ínfimo, apenas 2% segundo a EPE, o que é cerca de 7 GW, enquanto que a projeção de necessidade de crescimento na geração nacional é de 70 GW. Se trata de um crescimento não suficiente para atender a demanda crescente de energia elétrica do país.

Figura 1.7 – Evolução da capacidade de armazenamento do SIN.



Fonte: (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), 2007; MOREIRA, 2017)

Alinhado a todas estas dificuldades ambientais, licitatórias e financeiras, uma outra dificuldade entrava o crescimento brasileiro para com grandes centrais hidrelétricas. A própria dis-

tância entre centros consumidores e geradores. Moreira (2017) salienta que estas duas pontas da malha energética ficam, por ventura da necessidade geográfica de localização das unidades geradoras, muito distantes. Isto pode acarretar alguns problemas, pois as linhas de transmissão são sujeitas a problemas e acidentes, que por se tratar de grandes fontes de energia, a falta desta no sistema pode vir a ser catastrófica, com efeitos cascatas, racionamentos e até faltas de energia.

Como conclusão o autor Moreira (2017) comenta que a necessidade de crescimento da matriz geradora brasileira não pode estar atrelada ao crescimento unicamente de grandes unidades hidrelétricas como no passado. Hoje esta forma de grande magnitude não é mais viável e deve-se apostar em formas diferenciadas e de diferentes portes, garantindo uma estabilidade e diversificação da matriz energética.

1.2.1 Usinas hidrelétricas

As usinas hidrelétricas podem ser categorizadas de diferentes formas: quanto ao uso das vazões naturais; a potência; à forma de captação e a função no sistema. Para Reis (2011) a categorização de usinas por vazão se dá em três categorias: Fio d'água, reservatório de acumulação e reversíveis.

- as usinas a fio d'água, embora possam ter reservatórios, não utilizam dos mesmos para armazenamento e regulação da vazão. Simplificadamente, diz-se que este modelo de geração leva em conta o fluxo natural do curso d'água. Como ponto desfavorável lista-se sua falta de controle sazonal dependendo do regime de chuvas. Seus pontos a favor são o menor custo e a menor agressão ao meio ambiente.
- usinas com reservatório de acumulação apresentam o reservatório para uso em épocas de estiagem, garantindo a geração durante o ano. Todavia mais custosas e agressivas ao meio ambiente.
- já as usinas reversíveis apresentam uma ideia diferenciada e relativamente nova. Durante a necessidade de potência do sistema, este tipo de usina é capaz de fornecer energia máxima para suprir a demanda. Contudo, quando a demanda abaixa e sua geração já não é essencial, utiliza-se de energia do sistema para bombear água até um reservatório a montante que garanta a continuidade e o ciclo de trabalho. Desta forma esta unidade geradora pode produzir energia constante durante o dia, por exemplo, e no período da noite utilizar energia para estocar água.

Já referente a potência e queda Moreira (2017) categoriza as centrais hidrelétricas como:

Tabela 1.1 – Categorização de usinas hidrelétricas por potência e altura

Tipo	Potência	Tipo	Altura
Micro	$P < 75 \text{ KW}$	Baixíssima	$H < 10 \text{ m}$
Mini	$75 \text{ KW} < P < 3 \text{ MW}$	Baixa	$10 \text{ m} < H < 50 \text{ m}$
Pequena	$3 \text{ MW} < P < 30 \text{ MW}$	Média	$50 \text{ m} < H < 250 \text{ m}$
Média	$30 \text{ MW} < P < 100 \text{ MW}$	Alta	$H > 250 \text{ m}$
Grande	$P > 100 \text{ MW}$	-	-

Fonte: Moreira (2017).

Algumas características, além dos tipos de usinas, são importantes para o planejamento energético e para a operação do sistema elétrico. Como Reis (2011) menciona o planejamento de expansão do sistema elétrico precisa ser adaptado ao diversos usos da água considerando-se centrais hidrelétricas. As hidrelétricas apresentam incertezas para suprir a demanda na ponta, visto que dependem de efeitos aleatórios climáticos e estocásticos das vazões. Para garantir uma melhora na contribuição de centrais hidrelétricas ao sistema pode-se aumentar a potência de pico, aumentar a energia instalada e/ou garantir uma expansão diversificada do parque gerador.

Com relação a potência e a energia produzida, segundo Reis (2011) as principais variáveis na geração de um usina hidrelétrica são a altura da queda e a vazão. A análise de um aproveitamento energético permite verificar que a energia útil será basicamente a energia potencial disponível menos as perdas.

$$P_e = \eta_{TOT} * g * Q_v * H_h \quad (1.1)$$

Esta equação entrega a potência elétrica gerada por uma usina (P_e), onde:

η_{TOT} é o rendimento total;

g a aceleração da gravidade;

Q_v a vazão, e;

H_h a altura.

Já a energia gerada depende do fator de capacidade, que é a relação entre a potência média e a máxima, da potência máxima fornecida e das horas. Para o caso de um ano a energia média fornecida seria expressa como:(REIS, 2011)

$$E_e = P_e * FCU * 8760 \quad (1.2)$$

Mas para que possa haver esta geração de potência e um fornecimento de energia ao sistema, é necessário transferir o movimento das águas, armazenadas ou não, para a unidade gera-

dora. Este torque, giro, que o gerador necessita para operar vem da conversão de movimentos efetuada pelas turbinas.

Segundo diz Reis (2011) o estudo da escolha de uma turbina envolve a análise de fenômenos complexos, como o desempenho dinâmico, turbilhoamento, cavitação entre outros. De modo geral como função das variáveis básicas, altura e vazão, há um tipo específico de turbina que melhor se encaixa ao projeto. Os modelos mais utilizados são as turbinas Pelton, Francis e Kaplan.

- para grandes altura e baixa vazão, é mais apropriado as turbinas Pelton.
- com pequenas alturas e grande vazão, é melhor aplicado as turbinas Kaplan.
- como estágio intermediário de vazão e altura, as turbinas Francis encontram um melhor resultado.

Outras topologias podem ser aplicadas a diferentes situações. Na verdade cabe a cada caso estudar, escolher o modelo, ou até mesmo adaptar certas configurações para garantir melhor viabilidade econômica e sustentabilidade.

1.3 MICROCENTRAIS HIDRELÉTRICAS

A popularidade em torno da autoprodução de energia hidrelétrica atualmente, deve-se ao fato de grande parte das unidades rurais possuírem rios com corredeiras ou com quedas d'águas que poderiam ser utilizadas para acionamento de máquinas, irrigação e para geração de eletricidade. Segundo Farret (2010) a primeira microcentral hidrelétrica mundial é datada de 1883 quando, na Irlanda do Norte, um trem elétrico foi abastecido a partir de duas turbinas de 52 HP. No Brasil, em 1883, na cidade de Diamantina houve o primeiro projeto neste sentido, gerando 12 KW com um desnível de 5 m.

Micro aproveitamento elétrico é toda forma de utilização de qualquer das várias fontes de energia encontradas na natureza, passíveis de serem economicamente convertidas em energia elétrica até um limite legal. (FARRET, 2010). As microcentrais, diferentemente das geradoras de maior porte, são mais livres em relação as normas e regulamentações, apresentando uma forte dependência em relação às cargas às quais são conectadas para o controle de tensão e frequência. Em geral são empreendimentos que permitem o investimento gradativo, em vista de seu tamanho reduzido, e podem servir para garantia de atendimento a consumidores isolados ou até a grupos.

Existem opções para dimensionamento da capacidade de geração da microcentral. Primeiramente pode-se optar pela geração que garanta o consumo próprio assim como a venda do

excedente para a concessionária. Como segunda opção, existe a possibilidade de geração que simplesmente diminua a necessidade de utilização da distribuidora de energia (seria visto como uma diminuição do consumo na unidade geradora apenas). E como terceira opção é possível armazenar a energia para diminuição de demanda nas horas de pico (armazenamento em baterias, água, etc).(FARRET, 2010).

Com isto percebe-se que o uso para geração isolada, ou para redução de consumo do fornecedor de energia, de uma microcentral difere das usinas de maior porte, pois o objetivo é local, e frente ao sistema interligado toda esta geração poderia ser vista apenas como uma carga. Frente ao exposto, o projeto de uma microcentral hidrelétrica não é o mesmo que de uma PCH de menor porte, por exemplo, mas sim menos complexo e visando os balanços econômicos de viabilidade.

Para Farret (2010) no estudo da implementação de uma microcentral hidrelétrica é necessário inicialmente duas considerações básicas: Estudo de projeto no âmbito ambiental e potência aproveitável/esperada. Para o caso ambiental, deve-se escolher entre duas configurações: Fio d'água ou reservatório. A primeira configuração causa menos impactos ambientais, uma vez que utiliza da vazão natural do rio, contudo uma central com reservatório de acumulação necessita de um levantamento topográfico para determinação da área de alagamento sujeita. Muitas vezes, para casos de microcentrais, é possível a utilização de métodos *bypass* onde a usina é vista como parte do rio, efetuando um breve e pequeno desvio nas águas. Independente do configuração escolhida, deve-se prezar pela manutenção natural da vida animal e vegetal, garantindo pouca influência na fauna e flora local.

Já referente a segunda consideração (potência) Farret (2010) simplifica algumas relações, trazendo que de modo geral a potência possível de ser aproveitada derivada do teorema de Bernoulli e se mantém constante para uma dada secção e posição na canalização.

$$\frac{v_e^2}{2g} + \frac{p}{\rho_a g} + H_h = \frac{P}{\rho_a g Q_v} \quad (1.3)$$

Onde: v_e é dado em metros por segundo; gravidade é uma constante em metros por segundo ao quadrado ($9.81 \frac{m}{s^2}$); p_e é considerado, sem variação da pressão atmosférica, em quilogramas-força por metro quadrado; H_h é escrito em metros; P_e dado em quilograma-metro por segundo, ou 736 W; e a densidade da água, ρ_a é considerada constante em metros cúbicos ($1000 \frac{kg}{m^3}$).

Na prática esta equação é a máxima potência que o local escolhido poderia fornecer. Contudo a ideia de geração através de um córrego perde um pouco do fôlego e entusiasmo quando considera-se as perdas envolvidas principalmente por máquinas grosseiras de geração e pelo limite teórico de 60% que a maioria da microcentrais esta limitada. Portanto, Farret (2010)

dita que a máxima geração que pode ser esperada, de forma simplificada, depende da vazão e da altura, descontando sua limitação teórica.

$$P_e = 6 * Q_v * H_b \quad (1.4)$$

Onde:

P_e é a potência e é dada em quilo-watts;

Q_v vazão em metros cúbicos por segundo e;

H_b é chamado de queda bruta, sendo a diferença entre a altura na captação d'água e na casa de máquinas, dada em metros.

Esta última relação é alcançada com apenas uma consideração: a variação de pressão no sistema é basicamente nula, pois se considera uma estrutura de dimensões reduzidas. Com isto, segundo o teorema de Bernoulli, a velocidade também será inalterada no processo, o que garante que a energia absorvida pela máquina geradora será aproximadamente igual a diferença de energia potencial que a água apresenta (queda bruta). O elemento '6' na equação compõem a aproximação do valor da gravidade multiplicado pela densidade relativa da água e o fator de limitação teórico de aproveitamento.

1.3.1 Legislação

Para Pinto (2018) a expressão geração distribuída é utilizada para categorizar, em especial de pequeníssimo porte, as formas de geração de energia elétrica localizadas próximas ao usuário final. Ela pode pertencer a um autoprodutor, a um produtor independente, uma cooperativa de geração ou até mesmo a concessionária. Este método de geração garante diminuição dos custos, uma vez que não depende dos gastos decorrentes de transmissão, e confiabilidade do sistema.

Segundo Moreira (2017) a legislação que corresponde a micro e minigeração distribuída tem sido elaborada desde 2010 com a iniciativa da ANEEL que buscou subsídios para a redução das barreiras enfrentadas na geração individual. O arcabouço regulatório já passou por muitas alterações afim de legislar sobre a produção própria de energia, a venda de excedente ou a compensação de consumo. Com a NR 482/2012 houve a padronização e o estabelecimento das diretrizes para a microgeração. Alguns pontos estabelecidos são:

- a única possibilidade de geração própria é por meio de sistema de compensação de consumo.
- a microgeração fica estabelecida como até 100 kW de potência instalada, por meio de fonte solar, eólica ou hidrelétrica. Salvo em cogeração qualificada.

- a compensação de consumo deve ser ocorrido no prazo máximo de 36 meses.

Após o lançamento destas normativas pela ANEEL, o movimento pró-geração distribuída cresceu consideravelmente, causando novas conversas e audiências públicas. Em uma destas audiências, ocorrida em 2012, o discurso culminou na criação do Convênio ICMS, onde os estados ficariam autorizados a conceder a isenção de ICMS sobre a anergia elétrica fornecida pela distribuidora à unidade consumidora-geradora. Novamente com audiência pública de 2015, uma nova normativa foi lançada garantindo maiores benefícios para a expansão das micro e minigeradoras. A NR 687/2015 regulariza que: (MOREIRA, 2017)

- a microgeração ficou definida como potência igual ou inferior a 75 kW, sendo liberada para qualquer fonte renovável de energia, mantendo a possibilidade de cogeração.
- a minigeração fica estabelecida como de 75 kW até 3 MW para fontes hídricas e de 75 KW até 5 MW para qualquer outra fonte de energia.
- permite-se a criação de cooperativas de geração compartilhada. Isto é, garante que indivíduos possam se unir para gerarem sua própria energia elétrica.
- o prazo de compensação passou a ser de 60 meses.
- uma grande central geradora não possa ser desmembrada para garantir os benefícios fiscais de uma micro ou minigeração.

Mesmo com grandes avanços na legislação da geração distribuída, a possibilidade de que apenas o excedente de geração seja objeto de compensação do consumo continua a ser um ponto de melhora para futuras legislações. Contudo a presença de microgeradoras na matriz energética brasileira é essencial para garantir a continuidade e segurança do sistema brasileiro.

Grandes empreendimentos de geração não são mais viáveis sendo caros e de grande impacto ambiental, por isso o governo, não somente brasileiro, tem feito esforços para a difusão destas tecnologias. Mesmo que ainda haja pontos a serem discutidos a geração distribuída é realmente uma necessidade e o futuro da matriz energética nacional.

1.3.2 Meio Ambiente e Impacto Ambiental

Para Polli e Reis (2015 apud GREENPEACE,) as pequenas, micro e minicentrals hidrelétricas tem apresentado bom resultado como política de incentivo a diminuição de emissões de carbono, uma vez que são empreendimentos de baixa emissão e que auxiliam o país a seguir honrando os compromissos e metas de diminuição das emissões.

Normalmente os impactos ambientais de microcentrais são diminutos, e quando ocorrem, são por razões de populações vizinhas ou por áreas ambientalmente sensíveis, devido a alterações no regime dos córregos liberado a jusante da estrutura. Quando constatado ocorrência de impactos ambientais de maior potencial é necessário a emissão de um relatório ambiental onde serão realizadas avaliações técnicas para levantamento e avaliação dos possíveis impactos. Também será utilizado deste relatório para oferecer opções que mitiguem os danos e defina programas de controle, recuperação e monitoramento do meio ambiente. (ELETROBRAS,).

Garantir uma geração energética, utilizando, de forma segura, dos recursos ambientais, a partir de fontes renováveis de energia, garantindo a proteção ambiental e social de determinada região, corrobora para uma eficiência energética, econômica e para o bem estar social.

A outorga de águas no estado de Santa Catarina é regulamentada pelo governo estadual. Segundo (IASC,) com o decreto de 1996 entende-se como uso da água: "[...] qualquer utilização, serviço ou obra em recurso hídrico, independentemente de haver ou não retirada de água, barramento ou lançamento de efluentes, que altere seu regime ou suas condições qualitativas ou quantitativas [...]". Ainda no mesmo decreto são definidas algumas situações que necessitam de outorga estadual ou não.

Usos Sujeitos a outorgas:

- derivação/Captação de parcela de água existente em um corpo hídrico, para consumo final, inclusive para o abastecimento público, ou insumo de processo produtivo;
- extração de água de depósito natural subterrâneo para consumo final, inclusive para o abastecimento público, ou insumo de processo;
- lançamentos em corpos d'água, de esgotos e demais resíduos líquidos e gasosos.
- usos de recursos hídricos para aproveitamento de potenciais hidrelétricos.
- extração mineral no leito do rio.
- outros usos e ações e execução de obras ou serviços necessários à implantação de qualquer intervenção ou empreendimento, que demandem a utilização de recursos hídricos, ou que impliquem em alteração, mesmo que temporária, do regime, da quantidade ou da qualidade da água, superficial ou subterrânea, ou ainda, que modifiquem o leito e margens dos corpos de água.

Usos dispensados de outorgas:

- usos de caráter individual para satisfação das necessidades básicas da vida.

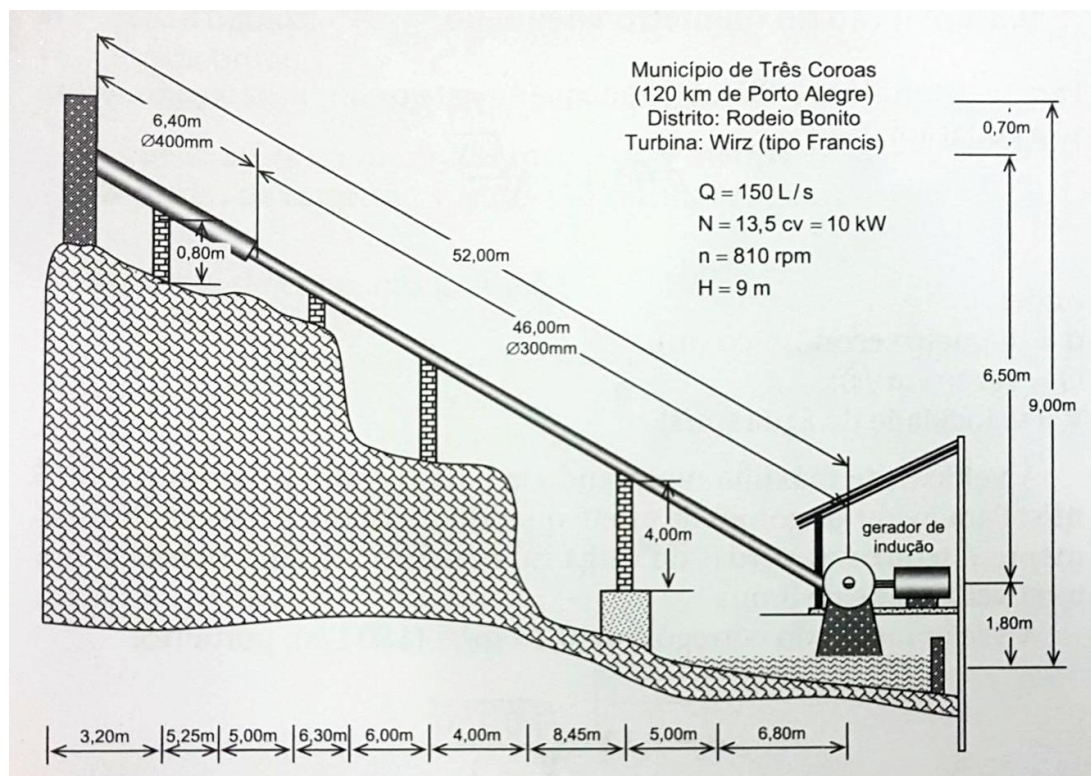
- extração de água subterrânea destinada exclusivamente ao consumo familiar e de pequenos grupos populacionais dispersos no meio rural.
- as acumulações, captações, derivações e lançamentos considerados insignificantes, tanto do ponto de vista de volume quanto de carga poluente.

1.4 PROJETO DE MICROCENTRAL HIDRELÉTRICA

Uma unidade geradora hidrelétrica, mesmo que de pequeno porte, apresenta uma gama de estruturas adjacentes responsáveis por garantir a segurança, estabilidade e longevidade da estrutura.

Balarim (1996) traz, como mostrado na Figura 1.9, um fluxograma que apresenta todas as estruturas que uma mini ou microcentral devem apresentar. Contudo, para os casos gerais de geração individual de microcentrais, as partes integrantes da estrutura são principalmente barragem, captação/conduto, casa de máquinas, vertedouro. Como exemplo desta configuração, o autor Farret (2010) apresenta um modelo de microcentral hidrelétrica (Figura 1.8) construído no município de Três Coroas (RS) que conta com uma unidade geradora citada na Tabela 1.2 com a utilização de uma turbina do tipo Francis Convencional de 15 kW.

Figura 1.8 – Instalação de microcentral em Três Coroas



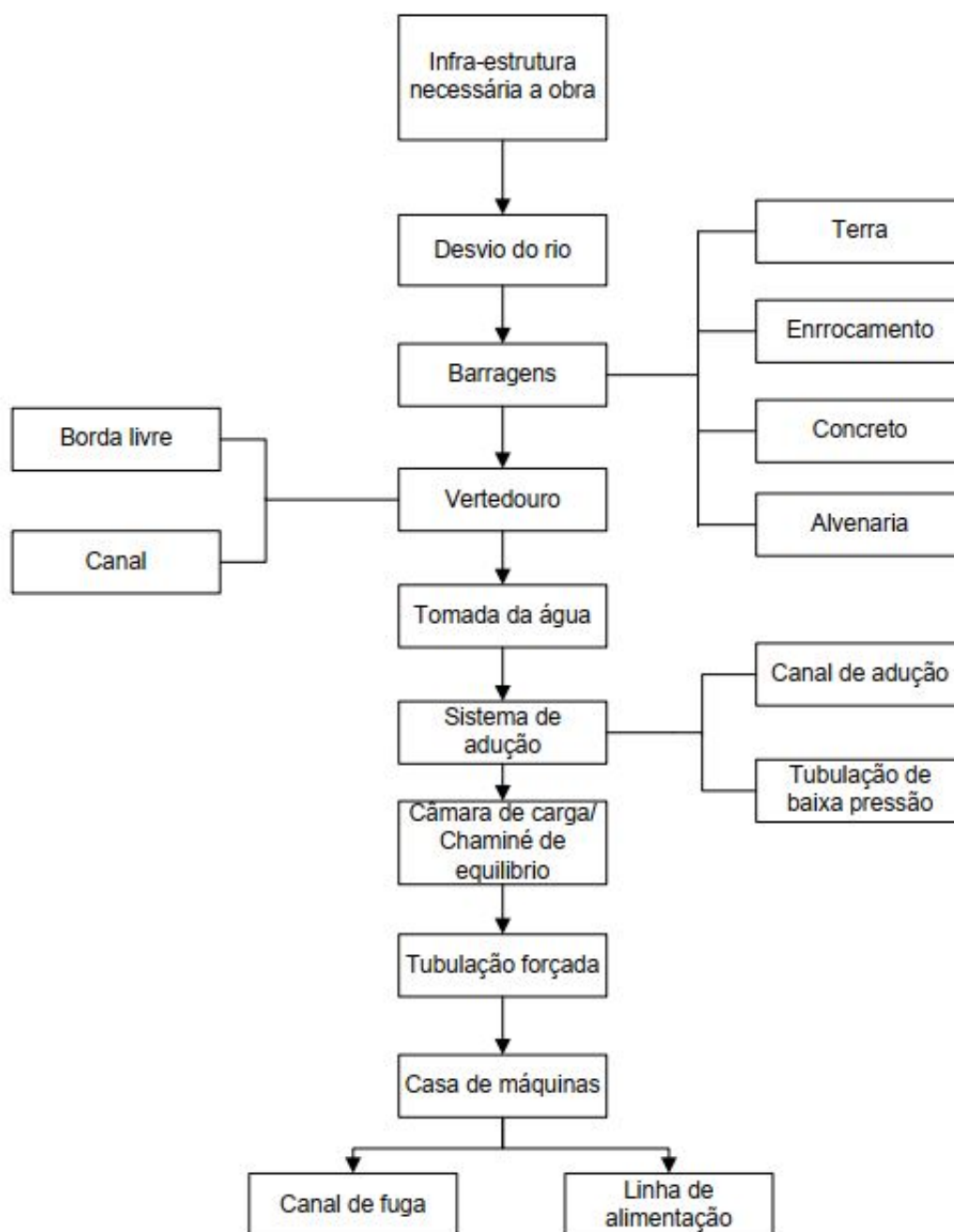
Fonte: (FARRET, 2010)

Tabela 1.2 – Unidade geradora utilizada na microcentral hidrelétrica do município de Três Coroas (RS)

MOD: B 132 M4	No 15458	Isol.: F
CV: 15	$\Delta - Y$	Cat.: H
220/380 V	60 Hz	1750 RPM
A: 38/22	$\frac{i_p}{i_n} = 8,7$	IP55

Fonte: Farret (2010).

Figura 1.9 – Estrutura dos componentes para micro e minicentraís hidrelétricas



Fonte:(BALARIM, 1996)

1.4.1 Obras civis

As obras civis de um empreendimento hidrelétrico compreendem a barragem, tomada de água, tubulação de potência, chaminés de equilíbrio, casa de máquinas e vertedouro. Contudo no viés econômico que uma microcentral se destina, é usualmente realizadas certas simplificações para o projeto.

Muitas configurações operam a fio d'água, onde basicamente se desvia a água do rio para que o movimento natural das águas produza o necessário à geração de energia. Esta configuração é muito similar a ideia das rodas d'água cubas de baixo, onde a unidade geradora se integra ao córrego naturalmente.

1.4.1.1 Barragens

A definição dada por Souza, Fuchs e Santos (1983) é de que uma barragem é toda obra de engenharia que tem por objetivo reter água, criando um desnível local. Este desnível local cria a montante um reservatório de acumulação, que pode ser utilizado para diferentes fins: irrigação, abastecimento de água pública/residencial, lazer ou geração de energia.

Polli e Reis (2015 apud DNAEE, 1985) determinam que, em caso de minicentrals hidrelétricas, a altura adotada para a barragem de ser da ordem dos 5 metros e que deve ser capaz de suportar adversidades e intemperes compatíveis com o local e objetivo ao qual foi instalada.

Segundo Alves (2007) o projetista deve sempre levar em conta a estabilidade na construção de uma barragem. Estas devem resistir a falhas de tensão, deslizamentos e reupturas. Algumas características podem servir como separação os tipos de barragem.

1.4.1.1.1 Barragem de terra

A recomendação da DNAEE (1985) é que esta tipologia seja utilizada para locais de grande disponibilidade de material argiloso e de rochas para fins de enrocamento (maciço de rochas para sustentação). Utiliza-se do solo escavado para canais de adução e vertedouro.

Para esta tipologia de construção, tendo em vista o simples objetivo de causar desnível hidráulico, as exigência de permeabilidade da estrutura são baixas, visando que tão somente não devem ocorrer vazamentos de maior velocidade que possam causar a erosão do estrutura e eventual colapso. (DNAEE, 1985).

1.4.1.1.2 Barragem de Enrocamento

A definição dada por Schreiber (1977) diz que barragens de enrocamento são construídas principalmente em locais onde existe rocha adequada sem grande cobrimento e material argiloso escasso.

Esta tipologia, segundo DNAEE (1985), é formada pela junção de pedras de maior porte e com elementos vedantes, do tipo argiloso por exemplo.

1.4.1.1.3 Barragem tipo gravidade

Souza, Santo e Bortone (2009) realçam a interessante propriedade da construção deste tipo de barragem. Nesta configuração a estrutura resiste à ação de forças externas exclusivamente devido ao seu próprio peso.

A estrutura é composta de um muro, cuja seção transversal é semelhante a de um triângulo retângulo, resiste a pressão do reservatório e a infiltração inerente as fundações. O vertedouro encontra-se preferencialmente no centro do vale e extravasa as águas excedentes. (DNAEE, 1985).

1.4.1.1.4 Barragem tipo misto

Schreiber (1977) define a barragem de tipo misto como realmente uma mistura das outras diversas topologias. Ela consiste na utilização de terra compactada para a construção de seu núcleo, enquanto chapas de concreto são posicionadas no exterior da estrutura. Enrocamento é presente para assegurar a estrutura e reforço de sua base.

1.4.1.2 Projetos Hídricos

Para projetos de centrais hidrelétricas a topologia e as características físicas, ambientais e sociais dos entornos, norteiam o tipo de barragem, a escolha dos vertedouros e dos sistemas de adução. Toda a definição dos sistemas estruturais deve levar em conta possíveis custos e o encontro do ponto ótimo da curva custo-benefício.

1.4.1.2.1 Conduto forçado

Os condutos forçados podem ser de aço, ferro, cimento, PVC ou até madeira, tudo dependendo da técnicas empregadas e do custo. Quanto a instalação podem ser a céu aberto

ou enterrados. Para casos de micro e minicentraís as tubulações são consideradas de mesmo diâmetro ao longo de todo o seu comprimento.

1.4.1.2.1.1 DIÂMETRO ECONÔMICO O manual da DNAEE (1985) lista o diâmetro econômico como "Aquele em que a relação custo/benefício é máxima". Como benefício é entendido a vida útil da central hidrelétrica e o custo é a soma dos gastos com materiais, instalação e manutenções.

O mesmo manual mencionado lista que este diâmetro pode ser encontrado através da Equação de Bondschu e relaciona algumas equações:

$$D_e = 127 \times \left(\frac{Q_v^3}{H_t} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (1.5)$$

Sendo que:

$$H_t = H_b + h_s \quad (1.6)$$

Já para casos de mini e microcentrais pode-se simplificar a relação:

$$h_s = 0,2 \times H_b \quad (1.7)$$

E portanto:

$$H_t = 1,2 \times H_b \quad (1.8)$$

O que resulta em um diâmetro econômico de:

$$D_e = 123,7 \times \left(\frac{Q_v^3}{H_t} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (1.9)$$

onde:

D_e é o diâmetro econômico em cm.

Q_v é a vazão da tubulação em $\frac{m^3}{s}$

H_t dita carga hidráulica sobre a tubulação, em m.

H_b queda bruta, em m.

h_s sobrepressão hidráulica do golpe de aríete, em m.

Equacionamento retirado de (POLLI; REIS, 2015).

1.4.1.2.1.2 VELOCIDADE DO LÍQUIDO Uma vez conhecido o diâmetro da tubulação, e supondo que se conheça a vazão da fonte d'água, o manual de DNAEE (1985) equaciona a velocidade do líquido no interior do conduto forçado como:

$$v_e = \frac{4Q_v}{\pi D_e^2} \quad (1.10)$$

Onde:

D_e é o diâmetro econômico em cm.

Q_v é a vazão da tubulação em $\frac{m^3}{s}$

v_e dita velocidade de escoamento, em $\frac{m}{s}$.

O cálculo da velocidade que o líquido terá permite definir o material a ser escolhido. No caso de microcentrais é indicado a utilização de aço ou concreto, sendo que o primeiro suporta até $5 \frac{m}{s}$ e o segundo $3 \frac{m}{s}$.

1.4.1.2.2 Vertedouro ou Extravasador

O extravasador de reservatório ou de barragem é uma obra projetada e construída com o objetivo de escoar o excesso de água acumulada pelo reservatório, evitando o risco de o nível de água atingir a crista do reservatório ou da barragem. (POLLI; REIS, 2015 apud SOUZA; SANTO; BORTONE, 2009).

Alves (2007) alerta que a operação correta do vertedouro é de extrema importância, uma vez que uma falha neste sistema pode levar a catástrofe da estrutura, o que pode acarretar em perdas materiais, ou até mesmo a vida, considerando tamanho do empreendimento e localização.

(DNAEE, 1985) menciona em seu manual que existem dois tipos de soluções para o extravasamento correto:

- extravasamento por canal lateral, por duto situado em cota elevada.
- extravasamento por crista, onde a água transborda controladamente por toda a crista da estrutura.
- extravasamento misto, onde pode ocorrer uma junção das duas estratégias.

1.4.1.2.3 Tomada de água e condutos adutores

Ainda anteriormente a adução de água deve ser dimensionado uma captação de água corretamente, visando uma segurança contra detritos e que possa, se necessário, possibilitar o secamento dos conduto, desviando o caminho das águas afim de manutenção. (SOUZA; SANTO; BORTONE, 2009).

Já os condutos adutores são os responsáveis pela ligação da tomada de água até a máquina hidráulica (turbinas). Schreiber (1977) elenca que esta conexão pode ser feita por canais de lâmina d'água, túneis sobre pressão e poços forçados. Estas construções podem ser feitas em solo natural, em concreto ou pedra argamassada.

1.4.1.2.4 Câmaras de carga

Estrutura que interliga o canal adutor com o conduto forçado. Souza, Santo e Bortone (2009) elenca que duas condições devem ser mantidas com a utilização da câmara de carga: garantir que não entre ar no conduto forçado para o caso de partidas bruscas; e garantir estabilidade em paradas bruscas.

1.4.1.2.5 Chaminé de equilíbrio

A finalidade da chaminé de equilíbrio é de amortecer as variações bruscas de pressão inerentes ao fechamento e abertura da turbina, protegendo contra o golpe de aríete e proporcionando um fluxo inicial para estabelecimento de regime permanente, respectivamente. (POLLI; REIS, 2015).

Nem sempre é necessária, uma vez que a câmara de carga pode operar suavizando o sistema. Contudo se for necessária sua utilização, é preferível que esteja mais próxima da casa de máquinas. (POLLI; REIS, 2015).

1.4.1.2.6 Golpe de aríete

Nos momentos de súbita mudança de carga, a pressão no interior da tubulação forçada sobre com a variação brusca, podendo ocasionar estragos e/ou deformações. Estas mudanças são decorrentes dos fechamentos ou aberturas das turbinas, e podem apresentar variações positivas ou negativas na pressão interna do conduto. (DNAEE, 1985).

Para o dimensionamento da tubulação forçada é necessário conhecer o pico de pressão resultante do fechamento abrupto das comportas, e o alívio máximo de pressão resultando da abertura das mesmas.

1.4.1.2.7 Canais de fuga

Os canais de fuga servem como uma proteção ambiental a erosão do solo e ao fluxo natural do córrego. No caso de elevada velocidade do líquido pelo conduto forçado esta velocidade sofre uma atenuação devido ao elemento gerador, contudo pode ainda apresentar uma energia cinética suficiente para influenciar na natureza do rio. Deve-se observar que haja a manutenção do ambiente natural, minimizando a influência causada pelo empreendimento, e para isto é instalado algum elemento que dissipe esta energia excedente das águas.

1.4.1.2.8 Caracol/Caixa Espiral

Tubulação de forma toroidal que envolve a região do rotor. Fica integrada à estrutura civil da usina, não sendo possível ser removida. Normalmente fabricada em chapas de aço carbono soldadas em segmentos. O caracol liga-se ao conduto forçado na seção de entrada e ao pré-distribuidor na seção de saída. (SOUZA; SANTO; BORTONE, 2009).

Basicamente desempenha a função de distribuir igualmente toda a água que chega na entrada da turbina, garantindo uniformidade. Utilizada nas turbinas do tipo Francis ou similares. No caso de micro e minicentraís hidrelétricas, pode ser obtido já turbinas com o caracol acoplado.

1.4.2 Máquinas hidráulicas

Para a seleção da correta máquina hidráulica utilizável em microcentrais hidrelétricas, Souza, Santo e Bortone (2009) cita a necessidade de se atentar não tão somente ao fator econômico, mas também a robustez e simplicidade do equipamento, de sua fácil operação e manutenção e de disponibilidade de assistência especializada assim como peças. Sempre deve-se conseguir com o fabricante um produto que tenha uma boa relação com cavitação, ruído e manutenção.

Com relação a cavitação, o mesmo Souza, Santo e Bortone (2009) define cavitação como a formação e subsequente colapso de bolhas, ou cavidades preenchidas, no interior da máquina com o líquido em movimento. Este fenômeno ocorre a partir de núcleos gasosos microscópicos presentes na água. Conforme ocorre a diminuição de pressão para menos do que a pressão de

evaporação da água, em diferentes pontos da estrutura, estas bolhas se formam e ocasionam ondas de choque que trazem efeitos destrutivos e a queda da potência de geração.

Algumas alternativas podem ser tomadas e algumas configurações possuem melhor proteção contra efeitos indesejados. Cada tipo apresenta vantagens e desvantagens sobre o outro. Para o tópico de microcentrais hidrelétrica pode-se listar algumas opções que apresentam bom custo e robustez para o desejado empreendimento.

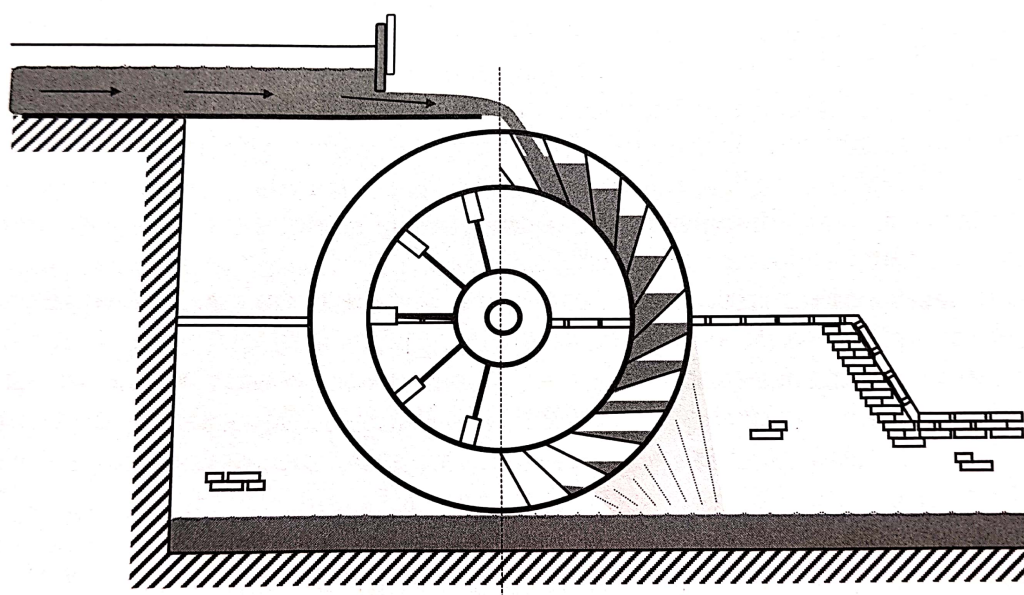
1.4.2.1 Rodas d'água

Rodas d'água são máquinas primitivas e muito simples, geralmente de madeira. São acionada por água num movimento tangencial a roda sem qualquer ação de impulso sobre as pás. (FARRET, 2010). O simples 'passar' das águas desenvolve um torque no seu eixo que gira a roda. Esta configuração geralmente apresenta uma grande estrutura, funciona com rotações bem baixas e tem um rendimento ruim devido aos atritos e a construção do dispositivo.

1.4.2.1.1 Roda d'água cubas de cima

Existem dois principais tipos de construção para rodas d'água: 'cubas de cima' e 'roda de baixo'. Segundo Farret (2010) o primeiro tipo funciona por meio do fluxo de água que enche os vasos da roda por cima. O peso da água acumulada gera o torque que gira o eixo da máquina.

Figura 1.10 – Roda d'água cubas de cima



Fonte:(FARRET, 2010)

Com a equação de Bernoulli pode-se aproximar a potência no eixo desta configuração de roda d'água por:

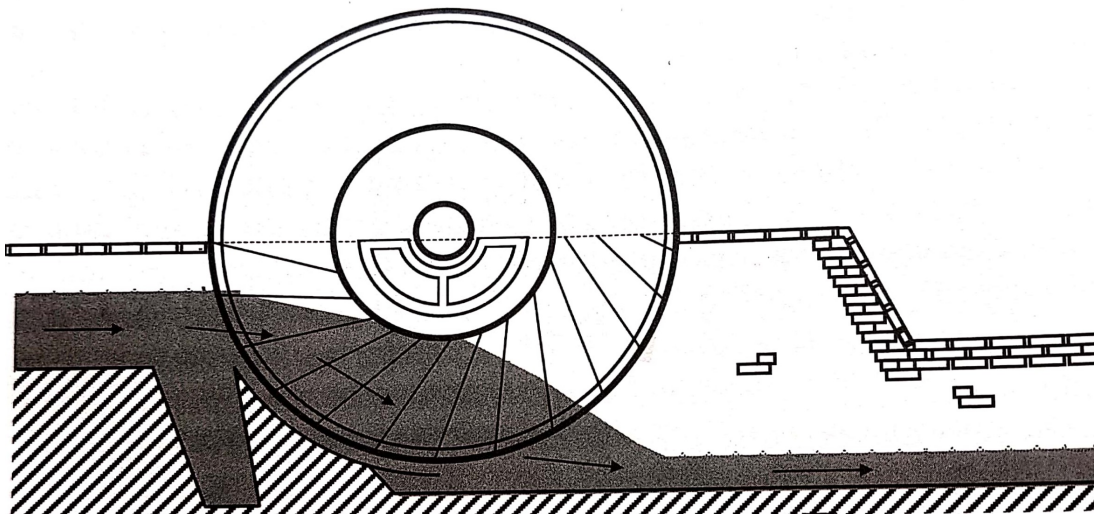
$$P_m = \eta * \rho_a * g * Q_v * H_b \quad (1.11)$$

1.4.2.1.2 Roda d'água cubas de baixo

A segunda configuração (roda d'água cubas de baixo) é denominada deste jeito, pois a água causa um empuxo na parte de baixo da roda. Esta configuração permite colocar a estrutura em flutuadores na corrente de água. Farret (2010) cita que a vantagem desta configuração esta no acompanhamento da variação de nível do córrego e a quase constância do torque, que para este caso é:

$$P_m = 0.5 * \eta * \rho_a * g * A_s * V_e^3 \quad (1.12)$$

Figura 1.11 – Roda d'água cubas de baixo



Fonte:(FARRET, 2010)

Farret (2010) cita que é importante levar em consideração a baixa velocidade que as rodas d'água giram, e que para a utilização destas configurações em um projeto de geração de eletricidade será necessário a utilização de multiplicadores de velocidade em torno de 1:20 assim como a implementação da regulação de velocidade, que não é fácil para rodas d'água robustas. Porém, é importante salientar que estas configurações apresentam algumas vantagens, como:

- fabricação e conservação simples
- funcionamento não é prejudicado por sólidos e sujeiras contidos nas águas

- o torque motor é compensado no caso de aumento de carga, uma vez que a desaceleração provocada pela demanda de carga é compensada pelo maior tempo no enchimento dos alcatruzes que aumentam o momento aplicado.

1.4.2.2 Turbinas

Turbinas são rodas acionadas por algum fluido em movimento, que as fazem girar por ação da energia contida sobre as palhetas de forma potencial ou cinética. Os princípios de funcionamento das turbinas variam conforme a forma de acionamento, sendo mais adequado para os fins de microgeração a utilização de modelos mais compactos, de material resistente (metal fundido) e com alto rendimento mecânico.(FARRET, 2010). Existem diversos modelos, como as mais diferentes vantagens e desvantagens, contudo visando os custos e priorizando os modelos mais consolidados para a microgeração, três alternativas se destacam:

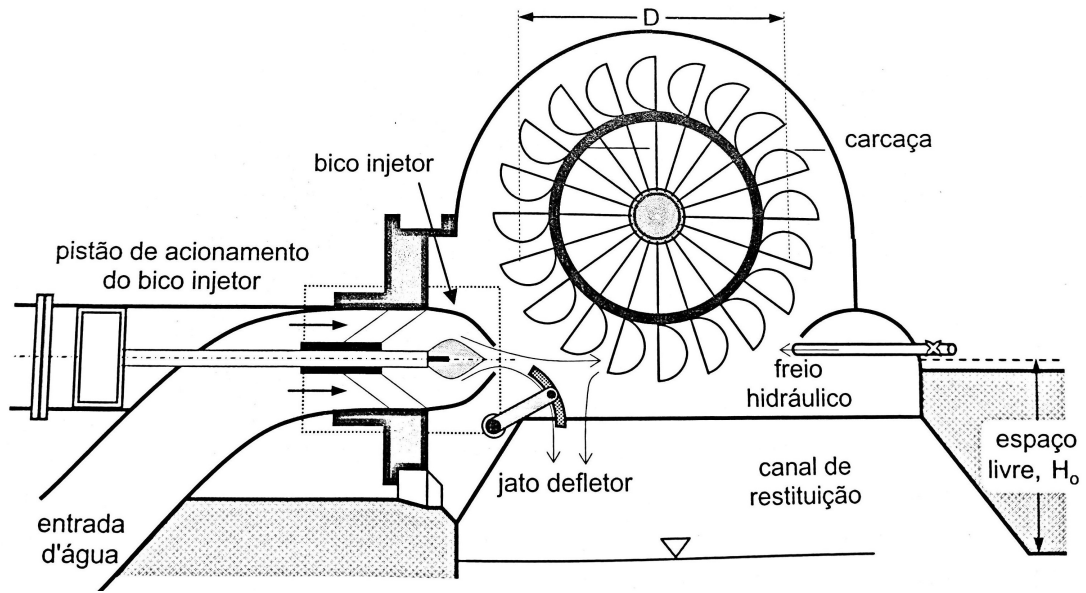
- Turbina Pelton (TP)
- Turbina Francis (TF)
- Bombas de água como turbinas (BA)

1.4.2.2.1 Turbina Pelton

A Turbina Pelton é uma turbina de ação (ocorre sem variação de pressão estática somente alterando a energia cinética do líquido). A energia potencial da água transforma-se em energia cinética mediante injetores que facilitam o impulso da água sobre as pás da roda motriz. (FARRET, 2010). Em casos mais rebuscados e para turbinas de maior magnitude, as TPs podem operar com múltiplos injetores e com grandes rodas motrizes. Em modelos mais modernos é utilizado divisores de fluxo no fundo de cada pá para evitar o retorno após o impacto da água. Dessa forma é otimizado e garante o melhor aproveitamento do fluxo de entrada.

Especificamente em casos de perda súbita de carga, este modelo de turbina, pode contrarregar se utilizando de um jato contrário que seja contrario ao movimento de rotação, assim freando a turbina.

Figura 1.12 – Seção transversal de uma Turbina Pelton



Fonte:(FARRET, 2010)

Esta tipologia de turbina é recomendável para vazões a partir de 10 L/s e quedas desde 20 m, pois se torna economicamente interessante, garantindo maior economia.

O diâmetro da coroa de pás pode ser escrito como função da queda líquida (H_b), da vazão (Q_v) e da rotação específica (n_s) da seguinte forma:

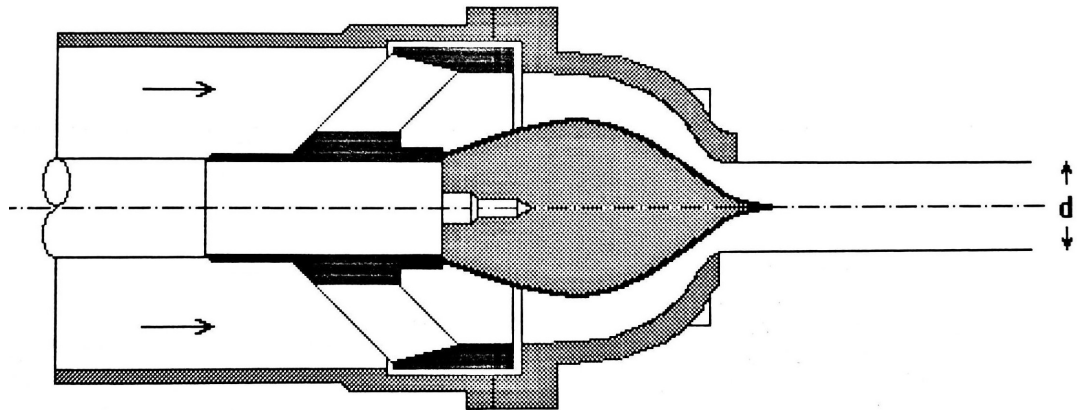
$$D_c = \frac{97.5 Q_v^{\frac{1}{2}}}{n_s^{0.9} H_b^{\frac{1}{4}}} \quad (1.13)$$

Para a qual a velocidade de rotação específica é definida pela Equação 1.8, onde z é o número de jatos e d é o diâmetro do jato d'água definido pela Equação 1.9.

$$n_s = 240 \times \frac{d_j}{D_c} \times \sqrt{z} \quad (1.14)$$

$$d_j = 0,55 \times \sqrt{Q_v} \times \sqrt{H_b} \quad (1.15)$$

Figura 1.13 – Bico injetor e diâmetro do jato de uma Turbina Pelton



Fonte:(FARRET, 2010)

Tanto a manutenção, quanto a instalação desta configuração de turbina é de fácil e rápida execução, mas para a otimização do rendimento da turbina Farret (2010) dita que é necessário manter a razão de D seja maior que $10 \times d$ afim de garantir o diâmetro ótimo do círculo rotor.

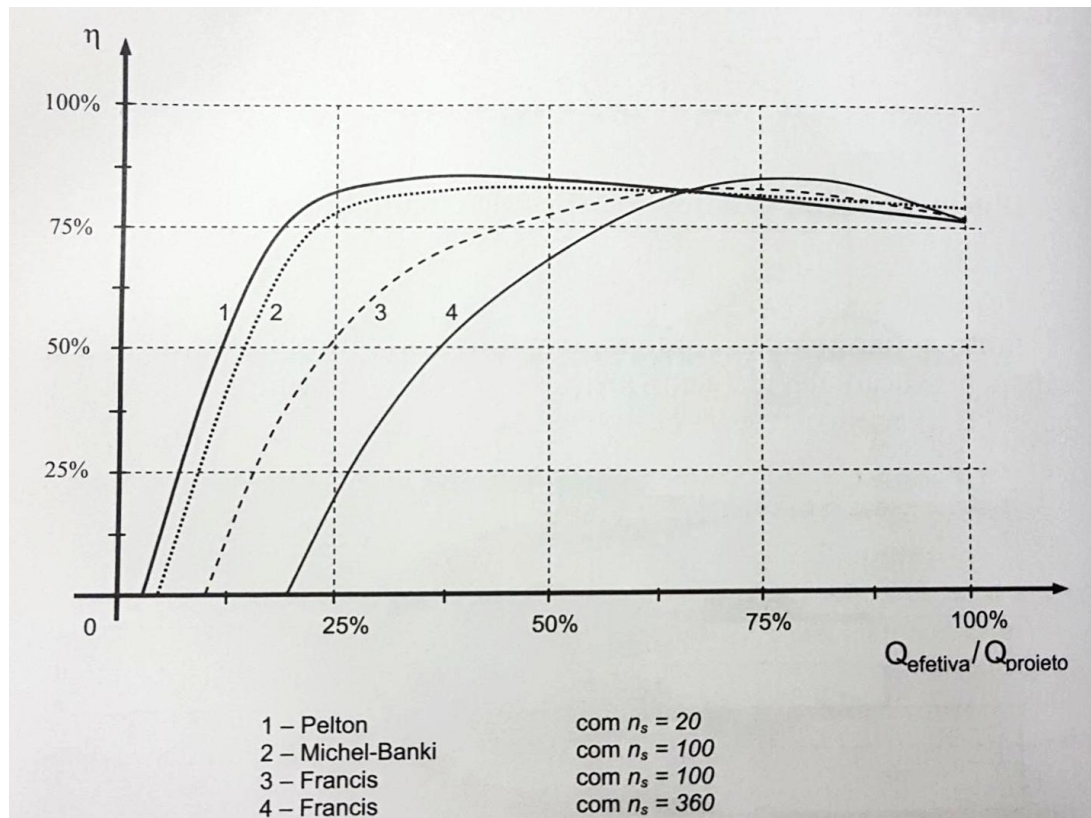
$$D_c = \frac{5,88 \sqrt{Q_v}}{\sqrt{z} H_b^{\frac{1}{4}}} \quad (1.16)$$

1.4.2.2.2 Turbina Francis

A Turbina Francis é uma turbina de reação (atua pela diferença de pressão). Seu campo de aplicação em microcentrais varia de alturas entre 2 e 15 m e vazões maiores que 100 L/s. (FARRET, 2010).

Em comparação com a anterior Turbina Pelton, a Francis apresenta melhor curva de rendimento, conforme ilustrado na Figura 1.12, apresentando uma maior constância de rendimento desde que a o fator carga-efetiva/carga-projetada mantenha-se maior que 25%, devido a pouca variação na velocidade do fluxo que a estrutura garante.

Figura 1.14 – Rendimento das turbinas para microcentrais hidrelétricas



Fonte:(FARRET, 2010)

Já como desvantagens Farret (2010) cita:

- montagem e manutenção mais trabalhosas
- susceptível à cavitação (geração de bolhas de água vaporizada nas regiões de baixa pressão que causam impactos a estrutura)
- tem um rendimento baixo para vazões muito menores que as de projeto
- sensível a materiais em suspensão

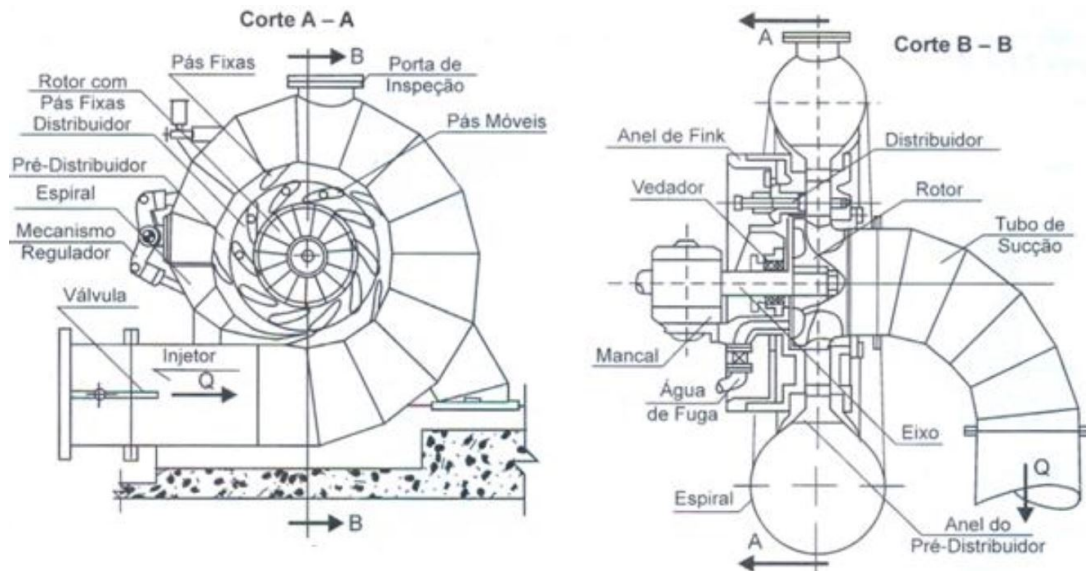
Farret (2010) cita Bereshnoi para concluir que a principal vantagem em escolher uma Turbina Francis ao invés de uma Pelton se dá no tubo de sucção, no qual a totalidade do desnível entre montante e jusante é aproveitada para a geração de energia. É apresentado duas relações: a primeiro relaciona o diâmetro do rotor com a altura da queda (H_b) e com suas rotações específica (n_s) e efetiva (n_e).

$$D_c = \frac{0,16 \, n_s \times 35,1 \sqrt{H_b}}{n_e} \quad (1.17)$$

$$n_s = \frac{n_e \sqrt{1,36 \times P_m}}{H_b^{\frac{5}{4}}} \quad (1.18)$$

De forma empírica, e com as devidas simplificações, pode-se estabelecer que até 50 m de queda garante a Turbina Francis um máximo de rotação de aproximadamente 1200 rpm.

Figura 1.15 – Estimativa dimensões da Turbina Francis



Fonte: (SOUZA; SANTO; BORTONE, 2009)

1.4.2.2.3 Bombas de água como turbinas

O uso de bombas de água como tecnologia reversa para geração de energia elétrica em microcentrais hidrelétricas tem ganhado popularidade devido ao baixo custo de instalação. Já, há algum tempo, se fazia uso desta tecnologia em casos industriais onde desejava-se recuperar uma energia que seria desperdiçada. Entretanto, algumas desvantagens como baixa eficiência, problemas de cavitação e de operação ainda atrapalham a maior difusão desta tipologia. (FARRET, 2010).

A diferença que ocorre entre a atuação como bomba ou como turbina esta no fluxo de água, que para o caso de uma turbina, esta ligado a altura da queda, que não possui eficiente método de controle. Já as turbina hidráulicas propriamente ditas, possuem sofisticados mecanismos de controle, que ocasionam no elevado custo de implementação.

Farret (2010) cita que considerando as perdas, a vazão da turbina e a altura de recalque podem ser obtidas por:

$$Q_b = 0,75 \times Q_v \quad (1.19)$$

$$H_r = 0,55 \times H_b \quad (1.20)$$

1.4.3 Unidades Geradoras

Para PCH's usualmente o gerador utilizado é do tipo síncrono, com operação em velocidade constante independentemente da carga elétrica posta em seus terminais (SOUZA; SANTO; BORTONE, 2009). O dimensionamento de um gerador envolve outras variáveis, como: número de polos, potência, tensão, fator de potência, rendimento e sistema de excitação.

O controle de velocidade do conjunto turbina-gerador é geralmente feito por um regulador de velocidade e a potência equacionada de um gerador pode ser expressa por:

$$P_e = P_m \times \frac{\eta}{\cos \phi} \quad (1.21)$$

onde:

P_e é a potência no gerador,

P_m a potência na turbina,

η o rendimento do sistema, e

$\cos \phi$ o fator de potência do motor.

1.4.3.1 Geradores Síncronos

1.4.3.2 Reguladores de Velocidade

A definição de reguladores de velocidade dada por Souza (1992) é: "Os reguladores de velocidade das turbinas hidráulicas tem por objetivo manter, durante a operação do grupo, a velocidade praticamente constante quando a carga é constante ou sofre variações, permitir variações da velocidade com tempo de retorno a velocidade nominal muito pequeno, sendo que a variação máxima da velocidade para uma rejeição total da carga não ultrapasse a sobrevelocidade de cálculo.

Estes reguladores são fundamentais no controle de geração da potência ativa, e para casos de microcentrais hidrelétricas usualmente são do tipo mecânico, isto é, servomecanismos que atuam por meio de óleo pressurizado, comandado por pêndulo centrífugo. (DNAEE, 1985).

A atuação do servomecanismo esta diretamente ligada ao distribuidor da turbina. Este é o responsável pelo fluxo de água que chega as turbinas e é por meio dele que são feitos os controle de acordo com a variação da carga na unidade geradora. (ALVES, 2007).

Para casos de sistemas isolados, Souza, Santo e Bortone (2009) indica a utilização do sistema RV isócrono. O modelo isócrono, no regime permanente, mantém a velocidade de rotação constante e igual à velocidade de referência, porém suas características em regime transitório são bastante precárias, por tal motivo são mais empregados em regimes de produção própria não ligados a rede elétrica.

1.4.3.3 Volante de Inércia

Volantes de inércia são empregados para os casos de pequenas centrais geradoras que precisam garantir uma regulação estável. São um outro método de garantir que haja um menor influência na geração devido as variações do fluxo de água nas turbinas. a DNAEE (1985) determina que estes volantes de inercia deverão ser produzidos em aço ou ferro fundido e especificados pelos fabricantes sua massa e diâmetro.

2 HIPÓTESE

A atual situação brasileira de geração de energia, aponta para uma saturação da possibilidade de grandes empreendimentos. Esta estagnação é um problema causado pela falta de locais apropriados, que não causem exagerados impactos ambientais, e por projetos que não estão mais apresentando uma boa relação de custo-benefício.

A elaboração de um projeto hidrelétrico, seja ele de grande ou micro porte, além de custoso, necessita de diversos estudos prévios, estruturas adjacentes que melhorem a robustez e a vida útil dos equipamentos, assim como sistemas de controle que consigam garantir a máxima eficiência e potência a carga variável.

Como solução ao crescimento da demanda brasileira de energia, as fontes renováveis são ainda uma ótima solução, contudo esbarram na problemática da utilização de espaços e da necessidade de transmissão em longas distâncias desta energia gerada.

Uma divisão das unidades geradoras tem ganhado destaque nos últimos 10 anos: a microgeração distribuída. Com ela é possível que um indivíduo utilize de seus próprios recursos energéticos (como sol, vento ou água) para garantir que sua demanda seja atendida. Atualmente a geração solar individual apresenta consolidação no mercado de geração distribuída, porém não é considerada acessível a todos, uma vez que demanda um alto investimento inicial que pode demorar mais de uma década para se pagar.

Diante de todo o cenário apresentado, este trabalho busca avaliar uma forma diferente de geração distribuída. Por meio da construção de uma microcentral hidrelétrica, buscar-se-á comparar os custos envolvidos e os resultados obtidos para elaborar um parecer econômico sobre a viabilidade desta forma de geração distribuída.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, G. **Avaliação da viabilidade de aplicação de uma microcentral hidrelétrica, para atender consumidores localizados em regiões isoladas**. 1. ed. Botucatu: Unesp, 2007. 156 p.
- BALARIM, C. **Avaliação expedida do custo de implantação de microcentrais hidrelétricas**. Botucatu: UNESP, 1996. 162 p.
- DNAEE. **Manual de microcentrais hidrelétricas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras, 1985.
- ELETROBRAS. **Diretrizes para projetos de PCH**. Disponível em: <<https://eletrobras.com/pt/Paginas/Manuais-e-Diretrizes-para-Estudos-e-Projetos.aspx>>. Acesso em: 04/04/2019.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Nacional de Energia - PNE 2030**. Brasil: Empresa de pesquisa energética (EPE), 2007.
- FARRET, F. A. **Aproveitamento de pequenas fontes de energia elétrica**. 2. ed. Santa Maria: Ed. da UFSM, 2010. 242 p.
- GREENPEACE. **Energia positiva para o Brasil**. Disponível em: <https://www.greenpeace.org.br/energia/pdf/dossie_energia_2004.pdf>. Acesso em: 04/04/2019.
- IASC. **Outorga de recursos hídricos**. Disponível em: <<http://www.aguas.sc.gov.br/instrumentos/instrumentos-outorga-principal>>. Acesso em: 04/04/2019.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key World Energy Statistics 2012**. Paris (França): IEA (International Energy Agency), 2012.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key World Energy Statistics 2013**. Paris (França): IEA (International Energy Agency), 2013.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Balanco Energético Nacional (BEN 2016)**. Brasil: Empresa de pesquisa energética (EPE), 2016.
- MOREIRA, J. R. S. **Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. 393 p.
- PINTO, M. **Energia Elétrica: Geração, Transmissão e Sistemas Interligados**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018. 136 p.
- POLLI, J.; REIS, H. dos. **Projeto de implantação da microcentral hidroelétrica de ronca-dor**. Curitiba: UTFPR, 2015. 106 p.
- REIS, L. B. dos. **Geração de Energia Elétrica**. 2. ed. Barueri: Manole, 2011. 460 p.
- SCHREIBER, G. **Usinas hidrelétricas**. 1. ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1977.
- SOUZA, Z. de. **Centrais Hidrelétricas: Dimensionamento de Componentes**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1992.

SOUZA, Z. de; FUCHS, R. D.; SANTOS, A. M. **Centrais hidro e termelétricas**. 1. ed. Itajubá: Edgard Blücher, 1983.

SOUZA, Z. de; SANTO, A. H. M.; BORTONE, E. da C. **Centrais Hidrelétricas: implantação e comissionamento**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2009. 520 p.