

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

LUIZ ANTONIO DE SOUZA

Análise de perspectivas das matrizes energéticas e da ampliação da geração de  
energia a partir de fontes renováveis com foco nas Pequenas Centrais  
Hidrelétricas

São Carlos

2018



LUIZ ANTONIO DE SOUZA

Análise de perspectivas das matrizes energéticas e da ampliação da geração de energia a partir de fontes renováveis com foco nas Pequenas Centrais Hidrelétricas

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica – ênfase em Sistemas de Energia e Automação, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad

São Carlos

2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA  
TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,  
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Atendimento ao  
Usuário do Serviço de Biblioteca  
"Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes" da EESC/USP

S729a Souza, Luiz Antonio de  
Análise de perspectivas das matrizes energéticas e da  
ampliação da geração de energia a partir de fontes  
renováveis com foco nas Pequenas Centrais Hidrelétricas /  
Luiz Antonio de Souza; orientador Frederico Fábio Mauad.  
-- São Carlos, SP, 2018.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com  
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

1. Pequena Central hidrelétrica - PCH. 2. Matriz  
energética. 3. Energia renovável. 4. Desenvolvimento  
sustentável. I. Mauad, Frederico Fábio. II. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Luiz Antonio de Souza

Título: "Análise de perspectivas das matrizes energéticas e da ampliação da geração de energia a partir de fontes renováveis com foco nas Pequenas Centrais Hidrelétricas"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado  
em 29/11/18,

com NOTA 8,0 (oit, zero), pela Comissão Julgadora:

*Prof. Associado Frederico Fabio Mauad - Orientador - SHS/EESC/USP*

*Prof. Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior - SEL/EESC/USP*

*Mestre Paulo Roberto Bairros da Silva - Doutorando - EESC/USP*

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:  
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino



“O Senhor é minha Luz e Salvação”

Salmo 26 (27)



## RESUMO

**SOUZA, L. A. Análise de perspectivas das matrizes energéticas e da ampliação da geração de energia a partir de fontes renováveis com foco nas Pequenas Centrais Hidrelétricas.** 2018. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Este trabalho traça análises e perspectivas sobre a capacidade de fornecimento de energia. Apresenta propostas e fatos que evidenciam que a inclusão de fontes renováveis nas matrizes energéticas, em especial as Pequenas Centrais Hidrelétricas, se apresentam como uma solução viável para suprir a energia necessária para promover o desenvolvimento sustentável. Mostra primeiramente uma análise histórica de como a engenharia hidráulica se desenvolveu e como pode contribuir para o desenvolvimento da sociedade. Em seguida, traz os conceitos sobre a geração hidrelétrica, definições técnicas e como são implementados os projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas. São elaboradas análises de perspectivas das matrizes energéticas em escala global e nacional, traçando a correlação entre energia, economia e desenvolvimento. A partir disso, essa monografia evidencia a necessidade da diversificação das fontes de energia e ampliação da capacidade de geração. Nesse contexto, mostra o cenário atual e como a implementação de PCHs têm um papel importante no projeto de sustentabilidade.

Palavras-chave: Pequena Central Hidrelétrica. Matriz energética. Energia renovável. Desenvolvimento sustentável.



## ABSTRACT

**SOUZA, L. A. Analysis of the perspectives of energy matrixes and of the expansion of power generation from renewable sources focusing on Small Hydroelectric Power Plants.** 2018. Final Project – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

This project outlines analyzes and perspectives on energy supply. It presents proposals and facts that show that the inclusion of renewable sources in the energy matrixes, especially the Small Hydroelectric Power Plants, that are presented as a viable solution to supply the energy needed to promote sustainable development. It presents first a historical analysis of how hydraulic engineering has developed and how it can contribute to social development. Next, it presents the concepts on hydroelectric generation, technical definitions and how the Small Hydroelectric Power Plants projects are implemented. Analyzes of perspectives of energy matrices are carried out on a global and national scale, drawing the correlation between energy, economy and development. From this, this thesis shows the need to diversify energy sources and increase power generation. In this context, it shows the current scenario and how the implementation of SHPs play an important role in the sustainability.

Keywords: Small Hydropower Plant. Energy matrix. Renewable energy. Sustainable development.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Aqueduto de Nîmes em <i>Pont du Gard</i> na Gália Romana (atual sul da França) .....	27
Figura 2 – Anotações e ilustrações de Leonardo da Vinci com vários mecanismos hidráulicos incluindo o parafuso de Arquimedes .....	28
Figura 3 – Perfil esquemático de uma usina hidrelétrica.....	34
Figura 4 – PCH Mogi Guaçu.....	42
Figura 5 – Arranjo típico para PCHs de baixa queda.....	45
Figura 6 – Arranjo típico de uma PCH afastada da queda .....	46
Figura 7 – Arranjo típico de uma PCH afastada da queda, quando não é possível adotar um canal.....	46
Figura 8 – Arranjo típico de uma PCH com alta queda e próxima da barragem.....	47
Figura 9 – Medição da queda por meio de duas réguas e um nível.....	49
Figura 10 – Medição da queda natural com régua e tubo plástico .....	49
Figura 11 – Ábaco de seleção do tipo de turbina .....	53
Figura 12 – Turbina Pelton.....	55
Figura 13 – Rotor Pelton .....	55
Figura 14 – Pás Francis .....	56
Figura 15 – Esquema de funcionamento de uma turbina Francis de eixo vertical.....	57
Figura 16 – Pás Kaplan.....	58
Figura 17 – Turbina Kaplan “S” jusante .....	59
Figura 18 – Turbina Kaplan “S” saxo .....	59
Figura 19 – Turbina Kaplan “S” montante.....	59
Figura 20 – Bomba centrífuga funcionando como turbina.....	60
Figura 21 – Esquema de Kaplan MGR (rotor com folga mínima).....	62
Figura 22 – Turbina Alden .....	62
Figura 23 – Cubos sem óleo .....	63
Figura 24 – Matriz Energética (%) em azul e Matriz Elétrica (%) em verde – Mundo 2016 ..	68
Figura 25 – Matriz Energética (%) em azul e Matriz Elétrica (%) em verde – Brasil 2016 ...	68
Figura 26 – Matriz Energética (%) em azul e Matriz Elétrica (%) em verde – Mundo 1973 - 2015 .....	69
Figura 27 – Matriz Energética (%) em azul e Matriz Elétrica (%) em verde – Brasil 1973 - 2015 .....	69

Figura 28 – Consumo Final Total por fonte ( <i>TFC</i> ) (ktep) por fonte – Mundo 1990 - 2016 ...	71
Figura 29 – Consumo Final Total por fonte ( <i>TFC</i> ) (em ktep) – Mundo 2016 .....	71
Figura 30 – Consumo de Energia Elétrica Total (em TWh) – Mundo 2016.....	72
Figura 31 – Consumo Final de Energia por Fonte (em tep) – Brasil 1970 - 2016 .....	75
Figura 32 – Consumo Final de Energia por Fonte (em %) – Brasil 1970 - 2016.....	75
Figura 33 – Consumo de Energia Elétrica (MWh/ <i>capita</i> ) – Mundo 2016.....	76
Figura 34 – Consumo de eletricidade <i>per capita</i> – Brasil 1990 - 2016.....	78
Figura 35 – Consumo de eletricidade <i>per capita</i> – Mundo 1990 - 2016.....	78
Figura 36 – Suprimento Total de Energia Primária ( <i>TPES</i> ) (todas as fontes) (Mtep) – Mundo 2016 .....	79
Figura 37 – Total de Geração de Eletricidade (GWh) (todas as fontes) – Mundo 2016.....	80
Figura 38 – Demanda de energia primária (Mtep) por fonte – Mundo 1970 - 2040.....	81
Figura 39 – Empreendimentos em Operação .....	85
Figura 40 – Empreendimentos em Construção .....	86
Figura 41 – Empreendimentos com Construção não iniciada .....	87
Figura 42 – Segundo Objetivo do Departamento de Mudanças Climáticas.....	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Porte das usinas .....	35
Tabela 2 – Capacidade de Geração das PCHs no Brasil .....	39
Tabela 3 – Classificação das PCHs quanto à Potência e quanto à Queda do Projeto .....	44
Tabela 4 – Potência Disponível ( $P_d$ ) e Potência Necessária ( $P_n$ ) .....	51
Tabela 5 – Lista de países por Consumo de Energia - 2016 .....	72
Tabela 6 – Lista de países por PIB - 2016.....	73
Tabela 7 – Lista de países por PIB Paridade Poder de Compra (PPC) - 2016.....	73
Tabela 8 – Lista de países por Consumo de Eletricidade <i>per capita</i> - 2016 .....	77
Tabela 9 – Legenda.....	85
Tabela 10 – Empreendimentos em Operação .....	86
Tabela 11 – Empreendimentos em Construção .....	86
Tabela 12 – Empreendimentos com Construção não iniciada.....	87
Tabela 13 – Mudanças no setor elétrico brasileiro .....	91
Tabela 14 – Custo da Energia Entregue (R\$/MWh).....	101
Tabela 15 – Oportunidades e Ameaças .....	103
Tabela 16 – Demonstrativo do Resultado Contábil.....	104
Tabela 17 – Fluxo de Caixa do Investimento .....	105



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAPCH	–	Associação Brasileira de Pequenas Centrais Hidrelétricas e Centrais Geradoras Hidrelétricas
ANA	–	Agência Nacional de Águas
ANEEL	–	Agência Nacional de Energia Elétrica
BRICS	–	Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul
CCEE	–	Câmara de Comercialização de Energia
CERPCH	–	Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas
CGH	–	Central Geradora Hidrelétrica
CGU	–	Central Geradora Undi-elétrica
DRDH	–	Declaração de Reserva de Disponibilidade Hídrica
EOL	–	Central Geradora Eólica
EPE	–	Empresa de Pesquisa Energética
ESHA	–	<i>European Small Hydropower Association</i>
FMI	–	Fundo Monetário Internacional
IEA	–	<i>International Energy Agency</i>
IHA	–	<i>International Hydropower Association</i>
MMA	–	Ministério do Meio Ambiente
MME	–	Ministério de Minas e Energia
OECD	–	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ONU	–	Organização das Nações Unidas
PCH	–	Pequena Central Hidrelétrica
PROINFA	–	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
REN21	–	<i>Renewable Energy Policy Network for the 21st Century</i>
SIN	–	Sistema Interligado Nacional
tep	–	Tonelada equivalente de petróleo
TUSD	–	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
UFV	–	Central Geradora Solar Fotovoltaica
UHE	–	Usina Hidrelétrica
UTE	–	Usina Termelétrica
UTN	–	Usina Termonuclear



## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 Objetivo .....	19
2 APROVEITAMENTOS HIDRÁULICOS .....	21
3 HISTÓRIA DA ENGENHARIA HIDRÁULICA.....	25
4 USINAS HIDRELÉTRICAS .....	33
5 PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS .....	37
5.1 Componentes de uma Pequena Central .....	39
5.2 Classificação das Centrais quanto à capacidade de regularização .....	41
5.2.1 PCH a fio d'água .....	41
5.2.2 PCH de acumulação, com regularização diária do reservatório.....	43
5.2.2 PCH de acumulação, com regularização mensal do reservatório.....	43
5.3 Classificação das Centrais quanto ao sistema de adução .....	43
5.4 Classificação das Centrais quanto à potência instalada e quanto à queda do projeto .....	43
5.5 Tipos de Arranjos de Pequenas Centrais Hidrelétricas .....	44
5.5.1 Pequena Central de baixa queda.....	44
5.5.2 Pequena Central afastada da queda .....	45
5.5.3 Pequena Central afastada da queda sem canal.....	45
5.5.4 Pequena Central com alta queda e próxima da barragem.....	47
5.6 Análise de Hidrometria.....	47
5.7 Análise do Terreno .....	48
5.8 Potência Disponível Bruta .....	50
5.9 Potência Instalada .....	50
5.10 Turbinas e Geradores.....	51
5.10.1 Seleção de Turbinas.....	53
5.10.2 Turbina Pelton .....	54
5.10.3 Turbina Francis.....	56
5.10.3.1 Turbina Francis com caixa espiral.....	56
5.10.3.2 Turbina Francis com caixa aberta.....	57
5.10.3.2 Turbina Francis dupla.....	58
5.10.4 Turbina S .....	58
5.10.5 Turbina Bulbo com multiplicador .....	60

5.10.6 Outras Turbinas .....	60
5.10.6.1 Rotores com folgas mínimas .....	61
5.10.6.2 Turbina Alden.....	61
5.10.6.3 Cubos sem óleo.....	63
5.11 Etapas dos projetos de PCH .....	63
6 MATRIZ ENERGÉTICA.....	67
6.1 Análise da energia por fonte.....	80
7 VANTAGENS DAS PCHS.....	85
7.1 Situação Atual no Brasil – SIN e PROINFA.....	85
7.2 Análise dos impactos ambientais.....	92
7.3 Principais Benefícios das PCHs .....	94
8 ANÁLISE DAS VARIÁVEIS NA IMPLANTAÇÃO DE PCHS .....	99
8.1 Crescimento do Consumo.....	99
8.2 Custos da Energia .....	99
8.3 Preço de venda da Energia.....	102
8.4 Possíveis Oportunidades e Ameaças .....	102
8.5 Como é feito o estudo de viabilidade econômica .....	103
8.5.1 Taxa Interna de Retorno (TIR) .....	103
6 CONCLUSÃO.....	107
REFERÊNCIAS .....	109
ANEXO I – Fluxograma de Implantação de uma PCH - Eletrobrás.....	115
ANEXO II – Fluxograma de Atividades para Estudos e Projeto Básico de uma PCH - Eletrobrás.....	116
ANEXO III – Nota do MMA sobre Efeito Estufa e Aquecimento Global.....	117

# 1 INTRODUÇÃO

Existe atualmente um desafio na forma como ocorre a geração de energia. Tal desafio integra três objetivos principais: a promoção do desenvolvimento, garantir que não sejam emitidas grandes quantidades de poluentes na atmosfera e mitigar os impactos socioambientais nas proximidades das centrais geradoras. Soma-se a esse desafio o fato de que a demanda por energia tende a crescer globalmente.

Uma alternativa para o cenário atual passa pela utilização das fontes renováveis de energia. Essas fontes podem garantir geração de energia segura, promover um aumento da oferta de energia e conduzir ao desenvolvimento.

A Energia Hidráulica é a mais difundida dentre as fontes de energia renováveis. Também é a que tem sido utilizada há mais tempo e a que apresenta as tecnologias mais eficientes (WORLD ENERGY COUNCIL, 2016). A geração de eletricidade por energia hidráulica tem uma alta capacidade de ser flexível; uma vez que existem diferentes tipos de usinas e equipamentos que garantem a utilização do aproveitamento hidráulico em diferentes tipos de localidades.

No contexto atual em que é notável a crescente demanda por energia, as obras hidráulicas para geração se apresentam como uma alternativa viável para suprir a energia necessária para promover o desenvolvimento sustentável. Conforme os tópicos a serem abordados ao longo desse projeto, a ampliação de número de fontes de energia com o intuito de diversificar a matriz energética e de descentralizar os sistemas de transmissão e distribuição promovem a eficiência do sistema nacional. Conforme um planejamento ao longo do tempo, a inclusão de centrais geradoras, em especial pequenas centrais hidrelétricas, aumentam a garantia de abastecimento de energia fomentando uma expansão no setor elétrico.

## 1.1 Objetivo

Esse trabalho visa apresentar análises e estudos sobre como a energia é utilizada globalmente, quais são as visões futuras do setor e como a energia se qualifica como um motor de desenvolvimento em todo do mundo.

A monografia apresenta primeiramente uma análise de toda a ciência e tecnologia desenvolvida para fazer proveito da energia hidráulica; depois análises de como funcionam as centrais hidrelétricas, como são os projetos de Pequenas Centrais e como está situação atual no

setor. Apresenta análises sobre as matrizes energéticas mundiais, principais benefícios das pequenas centrais e como se dá a análise dos impactos ambientais e a viabilidade desse tipo de empreendimento.

De forma geral, essa monografia traça perspectivas em aspectos mundiais e nacionais de como a inclusão de fontes renováveis, em especial, Pequenas Centrais Hidrelétricas são fundamentais vetores para o desenvolvimento sustentável.

## 2 APROVEITAMENTOS HIDRÁULICOS

A água é um recurso vital. Atualmente existe um concernimento e um engajamento enorme por parte de iniciativas públicas e privadas em todo o planeta em relação ao uso sustentável da água. Além de ser fundamental para a vida na Terra, os aproveitamentos dos recursos hidráulicos constituem um dos principais motores do desenvolvimento científico-tecnológico e econômico da sociedade para geração de energia.

Segundo o *U.S. Geological Survey*<sup>1</sup>, cerca de 71% do planeta Terra é coberto pela água, sendo que os oceanos abrigam cerca de 96,5% da água. A água em nosso planeta se apresenta nos diferentes estados físicos; está presente na umidade atmosférica, nos rios e lagos, nos grandes blocos de gelo e calotas polares.

O aproveitamento dos recursos hídricos se dá tanto para a geração de energia elétrica, conforme é o foco desse trabalho, tanto para o abastecimento público em áreas urbanas e rurais, para os setores industriais, para pesca e aquicultura, para o turismo e recreação, para irrigação de plantações, para criação de animais e outros demais usos múltiplos. Tal aproveitamento se constitui como um vetor importante de desenvolvimento regional e deve ser planejado considerando os interesses de uso dos diversos agentes.

Nos últimos anos, houve um grande aumento no desenvolvimento de energia hidrelétrica no aspecto global. O total da capacidade instalada cresceu 39% de 2005 a 2015, com uma taxa média de crescimento de quase 4% ao ano (WORLD ENERGY COUNCIL, 2016). Tal aumento apresenta uma concentração nos mercados emergentes de países em desenvolvimento onde os aproveitamentos hidráulicos não só oferecem energia limpa, mas provém os usos múltiplos da água; garantem segurança no fornecimento de energia (energia firme) e facilitam a cooperação regional e o desenvolvimento econômico.

Existem inúmeros catalisadores que contribuíram para o aumento do uso do potencial hidráulico, dentre eles o aumento da demanda por energia elétrica, a flexibilidade de geração, a capacidade de armazenamento (com reservatórios), a gestão da água doce, a mitigação dos impactos ambientais, e o surgimento de soluções adaptativas – diferentes tipos de usinas, incluindo diferentes tipos de turbinas, geradores e demais componentes - que visam otimizar o uso do aproveitamento hidráulico.

---

<sup>1</sup> U.S. Geological Survey's (USGS) – é a agência científica ligada ao Departamento do Interior dos E.U.A. (U.S. Interior Department). Disponível em <<https://www.usgs.gov/>>. Acesso em: 7 set. 2018.

Ainda há controvérsias e críticas acerca do uso dos recursos hídricos para a geração de energia elétrica. Parte dos *stakeholders* ainda possuem visões influenciadas por projetos hidráulicos catastróficos que causaram grandes prejuízos ambientais. Contudo, há mais recentemente projetos sustentáveis que têm grande aceitação pelos investidores; sendo que as comunidades financeiras no mundo de forma geral têm apoiado tais projetos e configurando-os como casos de sucesso.

Com uma tecnologia já consolidada, a energia hidráulica é responsável por mais de 16% da produção global de eletricidade (REN21, 2016). Desde 2004, a oferta de energia hidrelétrica só vem crescendo principalmente pelo fato dos mercados emergentes enxergarem na energia hidrelétrica muitos benefícios como a possibilidade de armazenamento de energia e outros serviços ancilares que contribuem para uma gestão mais eficiente da água e da energia elétrica e promovem balanceamento nas redes de transmissão. Isso implica em uma forma de gerar energia cada vez mais barata.

Com o crescente uso de novas fontes de energia como a eólica e a solar para atender a demanda crescente, o número de projetos hidráulicos também tende a crescer, pelo fato do uso da energia hidrelétrica ser considerada um *asset*, um ativo importante no gerenciamento de sistemas de energia, que visa garantir o fornecimento renovável e confiável. Isso porque considera-se que energia hidrelétrica é possível de ser armazenada – uma vez que a água responsável por girar as turbinas pode ser represada em reservatórios.

Dessa forma, a energia hidrelétrica constitui uma importante vertente para o desenvolvimento global pois se configura com um dos principais ativos dos portfólios de fontes geradoras, bem como uma tecnologia de armazenamento de energia. Cerca de 99% do armazenamento operacional do mundo (incluindo armazenamento bombeado) é feito com projetos hidráulicos (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA, 2018).

A infraestrutura para projetos hidrelétricos integra uma gestão de água doce, sendo que projetos como os de armazenamento com reservatórios, geralmente fornecem uma variedade de serviços de valor agregado. Além de prover fornecimento confiável de energia, essa infraestrutura inclui uma variedade de benefícios macroeconômicos, como abastecimento de água, proteção contra inundações e contra períodos de seca, acarretando num melhor gerenciamento dos recursos hídricos, e possível viabilização de canais de navegação e irrigação.

Como infraestrutura de gerenciamento de água, também se espera que projetos hidráulicos desempenhem um papel importante frente às possíveis mudanças climáticas. Sendo então utilizados para ajudar a responder à possíveis eventos climáticos extremos, incluindo intensos e frequentes incidentes de inundação e períodos mais longos de seca. Esses múltiplos

serviços e benefícios revigoraram o interesse pela energia hidrelétrica e percepções alteradas de sua importância.

Ocorreram também avanços significativos nas práticas de desenvolvimento sustentável no setor para melhorar a aceitação e a disposição dos formuladores de políticas e do setor financeiro para que possam envolver-se no desenvolvimento de energia hidrelétrica por meio da flexibilização de leis e políticas de incentivo que, crucialmente, vêm ampliando investimentos e o desenvolvimento de parcerias público-privadas.

O desenvolvimento de qualquer potencial hidráulico deve cuidar para que os impactos ambientais provocados sejam mitigados e que além disso, conforme o Plano Nacional de Energia 2030 do Ministério de Minas e Energia, ir na direção de fazer com que um aproveitamento desse tipo possa ser um elemento de integração regional. Não se deve descartar o desenvolvimento de um potencial hidráulico com base nos argumentos simplificados que têm sido levantados contra a instalação de usinas hidrelétricas de maior porte. No caso do Brasil, estaremos deixando de utilizar aproveitamento de um potencial renovável e de baixo custo. É necessário ponderar uma análise de custo de oportunidade tendo em vista os impactos ambientais para as gerações futuras confrontando-os com os custos futuros mais altos que essas gerações pagarão pela energia, com os impactos ambientais produzidos pela opção que for escolhida. Considerando que todas as fontes de energia produzem impacto ambiental e que, inclusive, é possível uma eventual escassez futura da energia. Os países já desenvolvidos, em geral, fizeram uso dos seus potenciais hidrelétricos para crescerem. Países em desenvolvimento procuram ainda desenvolver o potencial que dispõem, a exemplo da China e da Índia (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE, 2007).

“O Brasil, detentor de um dos maiores potenciais do planeta, deve (ou pode) renunciar a essa alternativa?” (EPE, 2007, p.15). Com base nessa questão levantada no Plano Nacional de Energia 2030 do Ministério de Minas e Energia e da Empresa de Pesquisa Energética que esse trabalho foi desenvolvido como uma maneira de apresentar alternativas de diversificar a matriz energética nacional, ampliar a oferta de energia elétrica e promover a descentralização da geração de energia com o uso principalmente de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs).



### 3 HISTÓRIA DA ENGENHARIA HIDRÁULICA

*“If the word hydraulics is understood to mean the use of water for the benefit of mankind, then its practice must be considered to be even older than recorded history itself ”* (ROUSE; INCE, 1957).

Engenharia Hidráulica, por definição, consiste na aplicação dos conhecimentos específicos da engenharia em projetos envolvendo fluxos e fluidos – notavelmente se dá na utilização da água para o benefício da humanidade. Dessa forma, a prática da engenharia hidráulica pode ser considerada mais antiga que a própria História. O uso da energia hidráulica foi uma das primeiras formas de substituição do trabalho animal pelo mecânico, particularmente para bombeamento de água e moagem de grãos (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2005).

As mais importantes características da Energia Hidráulica são: a disponibilidade de recursos, a facilidade de aproveitamento e, principalmente, seu caráter renovável.

Há traços de canais de irrigação que precedem a História da Antiguidade registrada no Egito e na Mesopotâmia. Sabe-se que esses povos se desenvolveram através dos conhecimentos de aproveitamentos hidráulicos – fato que a História classifica-os como Civilizações Hidráulicas (ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 2018).

Na Mesopotâmia, o Rio Eufrates foi desviado para o Tigre de forma a suprir a quantidade de água necessária para o abastecimento e irrigação. Assim como há mais de seis mil anos o rio Nilo foi represado em Memphis com o propósito semelhante de controlar a vazão de água. Poços perfurados a enormes profundidades nesse período ainda existem, bem como aquedutos subterrâneos construídos sob o leito rochoso dos rios.

No território do atual Paquistão existem evidências arqueológicas de dutos de cerâmica, que datam de aproximadamente cinco mil anos, usados para o abastecimento de água em casas e drenagem de terras agricultáveis. Grandes projetos hidráulicos da Antiguidade também são encontrados na China, sendo que muitos deles tinham por objetivo o controle das enchentes. Tais fatos evidenciam de forma clara que através dos tempos a humanidade busca o desenvolvimento através dos aproveitamentos hidráulicos e que a Engenharia está em constante evolução.

Os estudos sobre Hidráulica dos povos antigos têm uma origem predominantemente empírica e prática - baseada em princípios desenvolvidos através de experiências ao longo dos séculos. Sendo que a Hidráulica tal como é estudada academicamente nos dias hoje é fruto de

uma estrutura científica que remete à um passado mais recente, a partir do método científico e de pesquisadores como Newton, Bernoulli e outros a serem mencionados.

A Hidráulica pode ser dividida em Hidrostática, ciência que trata dos líquidos estáticos e a Hidrodinâmica que estuda o movimento dos fluxos. Os princípios físicos Fundamentais são bastante conhecidos como o Princípio da Conservação da Massa, descrito pela Equação da Continuidade, e o Teorema de Bernoulli.

A Hidráulica atual tem como base a Física newtoniana, contudo muito dos conhecimentos foram desenvolvidos há cerca de dois milênios por filósofos da Grécia Antiga. Muitas das conjecturas elaboradas nesse período são mais relacionadas à Filosofia tratando de hipóteses que foram elaboradas para explicar a Natureza. Como destaque, temos Aristóteles (384 - 322 a.C.) que escreveu tanto sobre física quanto sobre metafísica. Um expoente no campo da Hidráulica é Arquimedes (287 - 212 a.C.) que argumentou que um corpo flutuante ou imerso está submetido a uma força ascendente igual ao peso do líquido que ele desloca. Isso é conhecido como Princípio da Hidrostática. Segundo a história apócrifa, ao descobrir tal fato, Arquimedes estava tomando banho e saiu nu pelas ruas gritando “Eureka!”.

Também na Idade Antiga, vários aquedutos romanos foram construídos para levar água de fontes distantes às cidades e vilarejos. Os aquedutos moviam a água apenas com a gravidade, a partir de uma inclinação dentro de canais de pedra, tijolo ou concreto. Muitos aquedutos existem até hoje e são exemplos de grandes obras da engenharia hidráulica.

No curso da história, outro destaque pela sua contribuição é Leonardo da Vinci (1452 - 1519), foi ele quem enfatizou o estudo da Natureza em vários aspectos. As especulações de Leonardo se davam acerca da mecânica de jatos d’água, vórtices, formação de ondas e estendiam até suas incríveis invenções<sup>2</sup>. Observando o fluxo dos rios, Leonardo da Vinci elaborou várias conjecturas acerca do movimento da água na superfície e abaixo, corrente d’água e erosão. Essas análises implicaram em projetos elaborados para construção de canais, vigias e portões móveis.

O abastecimento de água para os insurgentes centros urbanos da época e a necessidade de drenar bacias e manguezais levaram Leonardo a projetar máquinas e bombas hidráulicas além de aprimorar alguns projetos conhecidos desde a Antiguidade como o Parafuso de Arquimedes.<sup>3</sup>

---

<sup>2</sup> Informações do site *Le Macchine di Leonardo Da Vinci* - exposição permanente em Florença na Itália. Disponível em: <<http://www.macchinedileonardo.com/>>. Acesso em: 14 set. 2018.

Outra contribuição essencial foi feita pelo engenheiro holandês Simon Stevis (1548 - 1620). O Teorema de Stevin determina a variação da pressão hidrostática que ocorre nos fluidos, sendo descrito pelo enunciado:

“A diferença entre as pressões de dois pontos de um fluido em equilíbrio (repouso) é igual ao produto entre a densidade do fluido, a aceleração da gravidade e a diferença entre as profundidades dos pontos.”

A despeito de sugerir uma teoria que focasse no deslocamento dos corpos nos fluidos, Stevin propôs o conceito de “Paradoxo Hidrostático”, em que a pressão de um líquido independe da forma do recipiente, de modo que dependerá, tão somente, da altura da coluna líquida no recipiente (ROUSE; INCE 1957).

Figura 1 – Aqueduto de Nîmes em *Pont du Gard* na Gália Romana (atual sul da França)



Fonte: Pont du Gard (2018).

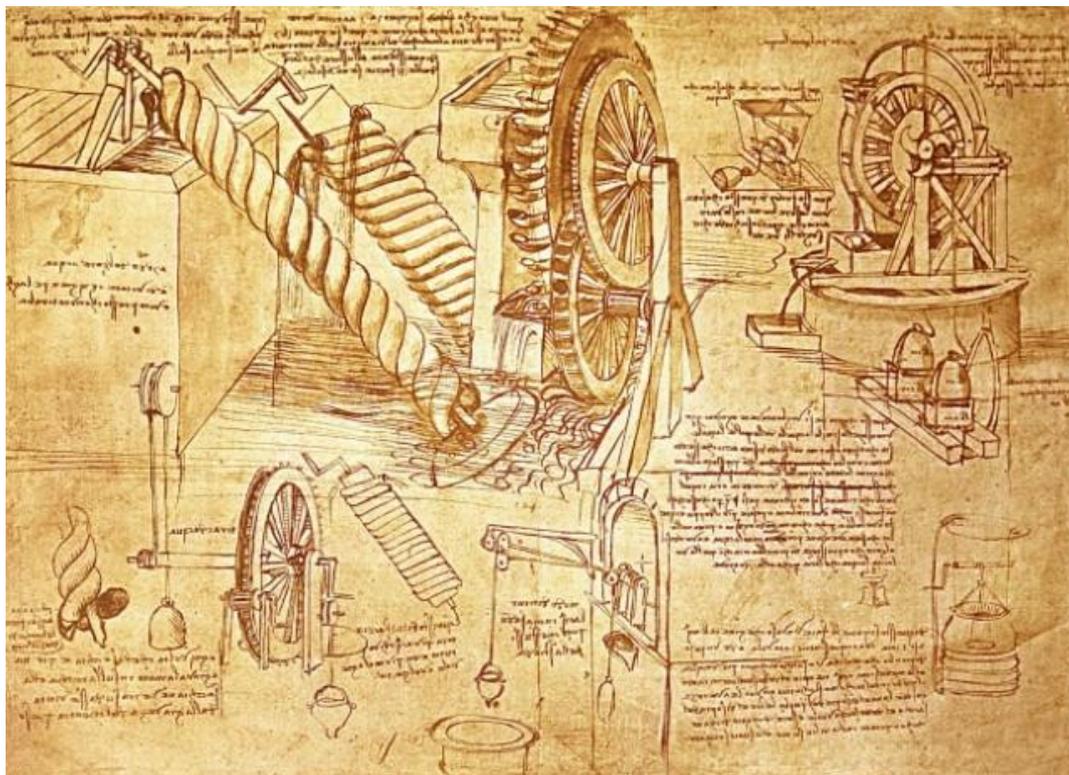
---

<sup>3</sup> Parafuso de Arquimedes: Também conhecida como o caracol de Arquimedes, esta máquina em forma de parafuso foi projetada para uso em irrigação e foi construída com uma hélice girando dentro de um tubo que permite elevar a água de um nível mais baixo para um nível mais alto. Seria movido por cavalos ou por homens. Também pode ser usado para mover materiais leves, como areia ou cinzas. Variações são ocasionalmente empregadas hoje, por exemplo, para o bombeamento de esgoto em estações de tratamento de águas residuais.

Fonte: Lemelson – MIT Program. Disponível em: <<http://lemelson.mit.edu/resources/archimedes>>.

Acesso em 14. set. 2018.

Figura 2 – Anotações e ilustrações de Leonardo da Vinci com vários mecanismos hidráulicos incluindo o parafuso de Arquimedes



Fonte: QGA (2018).

Galileu (1564 - 1642) através da análise científica, tanto experimentalmente quanto pela observação de fenômenos, foi quem deu luz à ideia inicial sobre a questão da aceleração gravitacional<sup>4</sup>. Enquanto Leonardo desenvolvia estudos de forma mais solitária, Galileu reuniu uma pequena escola ao seu redor. Um de seus alunos, o abade Benedetto Castelli (1577 - 1644), redescobriu o princípio da continuidade e aprofundou-se em outros aspectos da ciência, embora nem sempre corretamente. Seu colega mais jovem, Evangelista Torricelli (1608 - 1647), aplicou a análise do seu mentor sobre as trajetórias parabólicas de queda livre à geometria dos jatos líquidos. Torricelli também experimentou o barômetro líquido, sendo o vácuo acima da coluna líquida comparável ao vácuo que Galileu descobriu desenvolver em uma bomba cujo tubo de sucção excedeu um certo comprimento; em outras palavras, a natureza abominava o vácuo apenas até certo ponto.

Contribuições significativas vieram também na Itália com Domenico Gugliemini (1655-1710) na Universidade de Bologna com seus estudos relatados no *Aquarum fluentium mensura*

<sup>4</sup> GALILEI, Galileo. *Discorsi e Dimonstrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze* - Publicado em 1638, foi o último livro escrito por Galileu e traz a consolidação de grande parte do seu trabalho.

– *nova methodo inoivista* – um tratado sobre hidrometria. Já na França Edme Mariotte (1620 - 1684) que é considerado um dos precursores da mecânica dos fluídos experimental através de seus trabalhos chegou a uma lei que simultaneamente foi constatada pelo inglês Robert Boyle (1627 - 1691); a chamada Lei de Boyle-Mariette – que afirma que o produto da pressão e do volume de uma porção de gás é constante (ROUSE; INCE, 1983).

Nesse mesmo período, Blaise Pascal (1623 - 1662) faz constatações acerca dos questionamentos barométricos também tratados por Torricelli e dessa forma sintetizando a lei da hidráulica conhecida como Princípio de Pascal – que é definida basicamente como “A alteração de pressão produzida em um fluido em equilíbrio transmite-se integralmente a todos os pontos do fluido e às paredes do seu recipiente”.

Avanços científicos vieram com René Descartes (1596 - 1650) com o seu livro *Principia Philosophiæ*<sup>5</sup> no qual ele desenvolve sua teoria sobre os vórtices. Sendo que é a Descartes a quem devemos o sistema de coordenadas cartesianas. Os séculos XVI, XVII e XVIII em suma são marcados por cientistas notáveis e que desenvolveram estudos em distintas áreas do conhecimento humano.

Sir Isaac Newton (1643 - 1727) é considerado um dos mais influentes cientistas da história da ciência segundo o Ranking da *Royal Society* da Inglaterra de 2005, sendo que obra *Principia*<sup>6</sup> é considerada o livro científico de maior influência já publicado (GUICCIARDINI, 1999).

Nos seus trabalhos Newton descreveu a Gravitação universal, a três leis do movimento – estabelecendo as bases para a Mecânica Clássica que dominou a visão científica pelos três séculos subsequentes e é a base da engenharia moderna. Suas investigações vão da Mecânica, Termodinâmica a Óptica; sendo que ainda compartilha o mérito de desenvolvedor do Cálculo diferencial e integral com Gottfried Leibnitz (1646 - 1716). Ele também demonstrou o teorema binomial, desenvolveu o chamado “Método de Newton” para aproximação de raízes de funções e contribuiu para o estudo das séries de potência. Na parte da Hidráulica, ele conduziu diversos experimentos acerca da viscosidade dos líquidos e da tensão de cisalhamento. Newton exerceu um papel fundamental na modelagem de jatos de fluídos, levando em consideração a análise teórica e comparando com a análise mensurável de fluxos que atravessam orifícios (ROUSE; INCE, 1957).

Dos pioneiros a utilizar o cálculo conforme denotado por Leibniz estão os Bernoulli – Johann Bernoulli (1667 - 1748) e seu filho Daniel Bernoulli (1700 - 1783). Johann foi a Paris

<sup>5</sup> DESCARTES, René. *Principia Philosophiæ*. Amsterdam: Louis Elzevir, 1644.

<sup>6</sup> NEWTON, ISAAC. *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*. Londres, 1687.

para colaborar com o nobre francês Marquês de l'Hôpital; Daniel tornou-se membro da academia russa em São Petersburgo, onde foi acompanhado por Leonard Euler (1707 - 1783). L'Hôpital finalmente publicou as descobertas conjuntas (em grande medida as dele) sem o devido crédito ao seu colaborador, para grande desgosto de Johann. Quando Daniel publicou em 1738 o tratado original *Hydrodynamica*<sup>7</sup>, Johann começou a escrever um livro que ele chamou de *Hydraulica*<sup>8</sup>, talvez pela falha do l'Hôpital em reconhecer sua contribuição (ROUSE; INCE, 1957).

Na verdade, as primeiras conjecturas desenvolvidas pelos Bernoulli foram equações de aceleração aplicada às condições do fluxo irrotacional estável sob ação gravitacional. Também Euler merece crédito por várias equações da hidráulica e por inventar, ao menos teoricamente, uma turbina hidráulica viável. Digno de menção no mesmo fôlego de Euler e dos Bernoulli foi Jean Lerond d'Alembert (1717 - 1783), mais conhecido por sua participação na elaboração da Enciclopédia francesa, mas também por ser um matemático por direito próprio. Ele provou em 1752 que, sob condições irrotacionais e estáveis, um fluido não deveria oferecer resistência ao movimento relativo de um corpo imerso: o paradoxo de d'Alembert. Ele também é conhecido por ter sido um dos primeiros cientistas franceses a terem feito testes com tanque de reboque. No entanto, esses testes já haviam sido realizados uns nove anos antes por Benjamin Franklin (1706 -1790).

Franklin não foi o primeiro a conduzir testes em escala, cujo crédito deve-se a John Smeaton (1724 - 1792), um engenheiro inglês que foi um dos poucos cientistas experimentais em seu país a se tornar membro da *Royal Society*. No curso desse século, em seu trabalho premiado de 1759, "Uma investigação experimental sobre os poderes naturais da água e do vento para transformar moinhos e outras máquinas, dependendo de um movimento circular", Smeaton descreveu experimentos em modelos de rodas superpostas e moinhos de vento, avaliando-os a partir das relações gerais de potência.

Uma publicação dessa época que merece destaque é a *L'architecture Hydraulique*, publicada em quatro volumes entre 1737 e 1753, na qual Bernard Forest de Bélidor (1698 - 1761) escreve sobre eixos horizontais e verticais para máquinas hidráulicas. Nessa obra ele já utiliza o cálculo integral para resolver problemas técnicos. Contudo, somente no século XIX que o gerador elétrico foi desenvolvido e pode então ser acoplado às máquinas hidráulicas.

---

<sup>7</sup> BERNOULLI, Daniel. *Hydrodynamica*. Estrasburgo: JR Dulseckeri, 1738.

<sup>8</sup> BERNOULLI, Daniel. *Hydrodynamica*; BERNOULLI, Johann, *Hydraulica*, tr. T. Carmody and H. Kobus. New York: Dover Publications, 1968.

Na área da hidrometria, dois instrumentos de medição essenciais surgiram nesse período, o tubo de Pitot e o braço giratório. O primeiro ainda leva o nome de seu inventor, o francês Henri de Pitot (1695 - 1771), que o chamou de "máquina" para determinar a velocidade da água corrente. Ela consistia de dois tubos de vidro verticais conectados em sua parte superior por uma válvula, um tubo sendo simplesmente aberto na parte inferior e o outro em forma de L com a extremidade aberta apontando para cima; a diferença no nível de água entre os dois tubos após o fechamento da válvula e sua retirada do fluxo permitiram que a velocidade fosse calculada. O uso de um braço rotativo para impulsionar um corpo através do ar para determinação de arrasto foi desenvolvido pelo inglês Benjamin Robins (1707 - 1751), que também inventou o pêndulo balístico.

Dos homens cujos nomes são conhecidos na área de hidráulica, um deles foi o professor de Manchester, Osborne Reynolds (1842 - 1912), que em 1873 conduziu experimentos sobre o fluxo através de tubos, introduzindo a viscosidade para formar um parâmetro que marca a fronteira entre o fluxo laminar e turbulento, agora conhecido como o número de Reynolds.

Na época em que a hidráulica estava se tornando uma ciência aplicada, os matemáticos também estavam desenvolvendo uma contrapartida teórica. Poderosamente iniciada com Euler e d'Alembert, a prática foi continuada por homens igualmente famosos como Lagrange (1736 - 1813), Laplace (1749 - 1827), Helmholtz (1821 - 1894), Kelvin (1824 - 1907), e Rayleigh (1842 - 1919), como registrado nas muitas edições do tratado *Hydrodynamics* pelo professor de Manchester Horace Lamb (1849 - 1934). No entanto, embora presumivelmente lidando com os mesmos fluidos, os dois assuntos estavam muito distantes, pois a hidráulica ainda carecia de rigor matemático e a hidrodinâmica, contato suficiente com a realidade.

Os estudos de fluxo de fluidos foram subdivididos em hidrodinâmica clássica - uma abordagem puramente matemática com pouco interesse em trabalho experimental e hidráulica experimental. Navier (1785 - 1836), Stokes (1819 - 1903), e outros contribuíram para o desenvolvimento de um conjunto formidável de equações e métodos. Seus trabalhos concordavam apenas esporadicamente com os adeptos da hidráulica experimental e, de fato, haviam frequentemente grandes diferenças entre os resultados sugeridos pelas duas escolas. O rápido crescimento da indústria nos séculos XIX e XX produziu uma demanda por uma melhor compreensão dos fenômenos do fluxo de fluidos. O verdadeiro avanço veio com o trabalho de Prandtl (1875 - 1953). Ele propôs em 1901 que o fluxo fosse dividido em duas partes interdependentes. Existe, por um lado, o fluido livre que pode ser tratado como invíscido isto é, que obedece às leis da hidrodinâmica, e por outro lado, a 'camada de transição nos limites fixos' (a camada de transição é a fina camada de fluido dentro da qual as forças de atrito

dominam). Com esse *insight* brilhante, Prandtl efetivamente fundiu as duas escolas de pensamento díspares e lançou as bases para o desenvolvimento da ciência unificada da Mecânica dos Fluidos (CHADWICK; MORFETT; BORTHWICK, 2017).

O século XX, em consequência, viu avanços tremendos na compreensão e aplicação da mecânica dos fluidos em quase todos os ramos da engenharia. Só é possível dar o esboço mais básico aqui. Prandtl e Theodore von Karman (1881 - 1963) publicaram uma série de artigos nas décadas de 1920 e 1930, cobrindo vários aspectos da teoria da camada limite e da turbulência. Seus trabalhos foram complementados por pesquisas laboratoriais cada vez mais sofisticadas. Esses esforços tiveram impacto em todos os aspectos da engenharia de mecânica de fluidos. Nos anos 1930, os esforços de Nikuradse (1894 - 1979) na Alemanha, Lewis F. Moody (1880 - 1953) na América e outros resultaram em um entendimento mais claro dos fluxos de tubulação e, em particular, dos fatores que afetam o atrito do tubo. Isso levou diretamente aos métodos modernos para estimar fluxos em tubulações e canais (CHADWICK; MORFETT; BORTHWICK, 2017).

Desde o fim da segunda guerra mundial, o advento do computador eletrônico e os avanços nos equipamentos de detecção e registro de dados revolucionaram muitos aspectos da hidráulica. Nossa compreensão da natureza da turbulência, fluxos constantes e instáveis em canais, transporte de sedimentos e fenômenos marítimos se desenvolveram rapidamente. Isto foi acompanhado pelo desenvolvimento de *softwares* e de avanços tecnológicos na área de processamento digital de dados.

A engenharia atualmente conta fundamentalmente com o auxílio da computação. O engenheiro de hoje, com um moderno computador pessoal ou estação de trabalho à sua disposição, tem ferramentas para obter projetos mais eficazes e econômicos. A pesquisa internacional continua em um ritmo intenso, pois nosso mundo enfrenta muitos problemas sociais e ambientais. Nesse contexto que vemos a crescente demanda por energia, as obras hidráulicas para geração se apresentam como uma alternativa viável para suprir a energia necessária para promover o desenvolvimento sustentável.

## 4 USINAS HIDRELÉTRICAS

A energia hidráulica é proveniente da irradiação solar e da energia potencial gravitacional, através da evaporação, condensação e precipitação da água sobre a superfície terrestre (ANEEL, 2005). Apresenta uma relevante participação na geração de eletricidade, cerca de 17% da matriz de energia elétrica mundial conforme o Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2017). É a principal fonte geradora de energia elétrica em mais de trinta países. Dessa forma, se configura como a principal fonte renovável com tecnologias já consolidadas.

A participação da energia hidráulica na matriz de energia elétrica nacional é da ordem de 68%, o que corresponde a uma oferta interna total de cerca de 400 TWh com base em dados apresentados no Balanço Energético Nacional 2017 (ano base 2016) (EPE, 2017).

Apesar da tendência de aumento de outras fontes, devido à restrições socioeconômicas e ambientais de projetos hidrelétricos e aos avanços tecnológicos no aproveitamento de fontes não-convencionais; tudo indica que a energia hidráulica continuará sendo, por muitos anos, a principal fonte geradora de energia elétrica no Brasil. Embora os maiores potenciais remanescentes estejam localizados em regiões com fortes restrições ambientais e distantes dos principais centros consumidores, estima-se que, nos próximos anos, pelo menos 50% da necessidade de expansão da capacidade de geração seja de origem hídrica (ANEEL, 2005).

O recente processo de reestruturação do setor elétrico brasileiro tem estimulado a geração descentralizada de energia elétrica, de modo que as fontes não-convencionais, principalmente as renováveis, tendem a ocupar maior espaço na matriz energética nacional. Nesse contexto, as pequenas centrais hidrelétricas terão um papel extremamente importante, como abordado ao longo desse projeto.

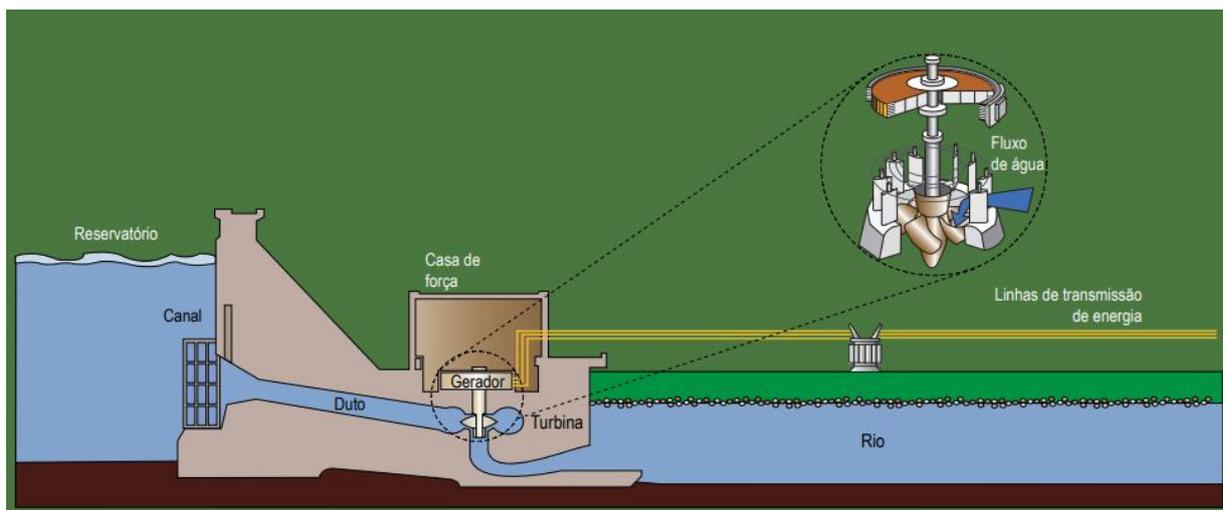
As usinas hidrelétricas têm a função de gerar energia. Para produzir a energia a partir do potencial hidráulico é necessário integrar a vazão do rio, a quantidade de água disponível em determinado período de tempo e os desníveis do relevo, sejam eles naturais, como as quedas d'água, ou criados artificialmente.

Na geração de energia hidrelétrica, a água é coletada ou armazenada em altitudes mais elevadas e conduzida para baixo, através de grandes tubulações ou túneis (comportas) até uma elevação mais baixa; a diferença nessas duas elevações é conhecida como altura de queda d'água. No final de sua passagem pelos canos, a água caindo faz as turbinas girarem. As turbinas, por sua vez, atuam nos geradores, que convertem a energia mecânica das turbinas em

eletricidade. Transformadores são então usados para converter as tensões alternadas geradas para altas tensões com magnitudes adequadas para a transmissão a longas distâncias.

Usinas hidrelétricas são geralmente localizadas em represas que captam rios, elevando assim o nível da água atrás da represa e assim otimizando o potencial hidráulico do sistema.

Figura 3 – Perfil esquemático de uma usina hidrelétrica



Fonte: ANEEL (2008).

O primeiro projeto hidrelétrico do mundo foi usado para acionar uma única lâmpada em uma casa de campo em Northumberland, Inglaterra, em 1878. Quatro anos depois, a primeira fábrica para servir um sistema de clientes privados e comerciais foi aberta em Wisconsin, Estados Unidos, e dentro uma década, centenas de usinas hidrelétricas estavam em operação.

Na América do Norte, usinas hidrelétricas foram instaladas em Grand Rapids, Michigan (1880); Ottawa, Ontário (1881); Dolgeville, Nova York (1881) e Niagara Falls, Nova York (1881). Elas foram usadas para abastecer moinhos e iluminar alguns edifícios locais.

No Brasil, em 1883 entrou em operação a primeira usina hidrelétrica no país, localizada no Ribeirão do Inferno, afluente do rio Jequitinhonha, na cidade de Diamantina. (COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS – CEMIG, 2012).

Na virada do século 20, a tecnologia estava se espalhando pelo mundo, com a Alemanha produzindo o primeiro sistema hidrelétrico de três fases em 1891, e a Austrália lançando a primeira fábrica no Hemisfério Sul em 1895.

Em 1895, a maior hidrelétrica do mundo da época, a Usina Edward Dean Adams, foi construída nas Cataratas do Niágara.

Em 1905, uma estação hidrelétrica foi construída no córrego Xindian, perto de Taipei, com uma capacidade instalada de 500 kW. Isso foi rapidamente seguido pela primeira estação na China continental, o plano Shilongba na província de Yunnan, que foi construído em 1910 e colocado em operação em 1912. Após a conclusão, Shilongba tinha uma capacidade instalada de 480 kW; hoje ele ainda está em operação com uma capacidade instalada de 6 MW.

Na primeira metade do século 20, os EUA e o Canadá lideraram o caminho da engenharia na área de energia hidrelétrica. Com 1.345 MW, a Represa Hoover no Rio Colorado tornou-se a maior usina hidrelétrica do mundo em 1936, superada pela Barragem Grand Coulee (1.974 MW na época, 6.809 MW hoje) em Washington em 1942.

Da década de 1960 até a década de 1980, grandes empreendimentos hidrelétricos foram realizados no Canadá, na URSS e na América Latina.

Nas últimas décadas, o Brasil e a China se tornaram líderes mundiais em energia hidrelétrica. A usina de Itaipu, abrangendo o Brasil e o Paraguai, foi inaugurada em 1984 com 12.600 MW (posteriormente foi ampliada e aumentada para 14.000 MW) e hoje é superada em tamanho pela represa de Três Gargantas, de 22.500 MW, inaugurada em 2008 (INTERNATIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION – IHA, 2018).

As usinas são classificadas conforme alguns padrões de variáveis como a altura de queda d'água, vazão, capacidade ou potência instalada, tipo de turbina, localização, tipo de barragem e reservatório. O Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas – CERPCH (2018) considera baixa queda uma altura de até 15 metros e alta queda, superior a 150 metros. A potência instalada é que determina o porte da usina conforme a ANEEL:

Tabela 1 – Porte das usinas

<b>Usina</b>	<b>Potência Instalada</b>
Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH)	Até 1 MW
Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH)	Entre 1,1 MW e 30 MW
Usina Hidrelétrica de Energia (UHE)	Mais de 30 MW

Fonte: ANEEL (2008).

No entanto, os fatores são interdependentes. Dessa forma, a altura da queda d'água e a vazão dependem do local de construção e determinarão qual será a capacidade instalada que, por sua vez, determina o tipo de turbina, barragem e reservatório. Existem dois tipos de reservatórios: acumulação e fio d'água (ANEEL, 2005). Os de acumulação conforme o próprio nome já diz funcionam como estoques de água, geralmente se encontram em locais com altas quedas d'água, nas cabeceiras dos rios e dessa forma possibilitam o acúmulo de uma grande

quantidade de água para ser usada para abastecer a usina. Dessa forma, é possível ter um controle da vazão de água. Os reservatórios de acumulação se localizam a montante das demais hidrelétricas e ao regular a vazão atuam na operação integrada do conjunto de usinas.

Já as usinas a fio d'água geram energia com o mínimo ou nenhum acúmulo do recurso hídrico, ou seja, apenas com o fluxo de água do rio.

## 5 PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

Conforme afirma a Diretora de Políticas da ESHA (*European Small Hydropower Association*): “As pequenas centrais hidrelétricas têm mantido a sua posição entre as fontes de energia renovável mais confiáveis e rentáveis.” (VOITH, 2018).

As Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) são usinas que apresentam entre 5 e 30 megawatts (MW) de potência instalada e devem ter menos de 13 km<sup>2</sup> de área de reservatório segundo a resolução atual da ANEEL.

Conforme o Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas – CERPCH (2018), as primeiras referências quanto ao enquadramento das PCHs no Brasil foram apresentadas no Manual de Pequenas Centrais, editado em 1982 pelo consórcio formado entre o Ministério de Minas e Energia – MME, o Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE e a Eletrobrás. O manual foi criado por ocasião do primeiro Programa Nacional de PCH – PNPCH.

As PCHs foram definidas por meio da portaria do DNAEE nº. 109, de 24 de novembro de 1982, pelas seguintes características:

- Operação em regime de fio d’água ou de regularização diária;
- Provisão de barragens e vertedouros com altura máxima de 10 m;
- Sistema adutor formado apenas por canais a céu aberto e/ou tubulações, não utilizando túneis;
- Estruturas hidráulicas de geração com previsão de uma vazão turbinável máxima de 20m<sup>3</sup>/s;
- Dotação de unidades geradoras com potência individual de até 5MW;
- Potência total instalada de até 10MW.

Houve uma mudança nessa classificação em 1984, quando o DNAEE por meio da Portaria nº 125 atuou esse enquadramento. Em 6 de outubro de 1987, pela Portaria DNAEE nº 136, as PCHs passaram a ser classificadas por apenas dois fatores: a potência deveria ser inferior a 10 MW, com unidades geradoras de no máximo 5MW.

Com a criação da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, em 1996, a regulamentação do setor passou a ser uma atribuição da ANEEL. Que por meio da Resolução nº 394, de 04 de dezembro de 1998, revogou as Portarias nº 125 e nº 136 do DNAEE e estabeleceu novos critérios para o enquadramento de empreendimentos hidrelétricos na

condição de Pequenas Centrais Hidrelétricas. Desse modo, passaram a ser consideradas PCHs os aproveitamentos hidrelétricos com as seguintes características:

- Potência igual ou superior a 1,0 MW e igual ou inferior a 30,0 MW;
- Área total de reservatório igual ou inferior a 3,0 km<sup>2</sup> com a cota d'água associada à vazão de cheia com tempo de recorrência de 100 anos.

Em 2003, a ANEEL através da Resolução nº 652 adicionou outras condições para a área do reservatório, caso o limite de 3,0 km<sup>2</sup> seja excedido, o aproveitamento ainda será considerado com características de PCH se forem atendidas pelo menos uma das duas condições seguintes:

Condição 1: Que a inequação abaixo seja satisfeita:

$$A \leq \frac{14,3 - P}{H_b} \quad (1)$$

Nessa expressão a área não poderá exceder 13,0 km<sup>2</sup>, área máxima da maior parte dos reservatórios das PCH da região norte/nordeste, sendo definida em nível d'água máximo normal à montante do barramento. A queda bruta é dada pela diferença entre os níveis d'água máximo normal de montante e normal de jusante.

Condição 2: Reservatório cujo dimensionamento, comprovadamente, foi baseado em outros objetivos que não o de geração de energia elétrica deverá ter essa condição comprovada junto a Agência Nacional de Águas – ANA, aos Comitês de Bacias Hidrográficas, aos órgãos de gestão de recursos hídricos e ambientais junto aos Estados; de acordo com suas respectivas competências.

No dia 20 de janeiro de 2015, foi sancionada a Lei nº 13.097, que modificou a legislação do Setor Elétrico das Pequenas Centrais Hidrelétricas (Seção I do Cap. VII), alterando os limites de potência para PCH, a capacidade mínima instalada para esse aproveitamento passou de 1MW para 3MW, sendo assim, os empreendimentos com potência instalada menor que 3MW estão dispensados de concessão, permissão ou autorização, devendo apenas ser comunicados ao poder concedente. Para produção independente ou autoprodução também foi modificado o limite máximo da capacidade instalada, passando de 30MW para 50MW, independentemente de ter ou não característica de pequena central hidrelétrica.

Como sugestão do CERPCH, pode-se completar a classificação acima adicionando as grandes centrais hidrelétricas – ou Usinas Hidrelétricas (UHE) – para empreendimentos com

potência instalada acima de 30 MW e as pico centrais hidrelétricas para aproveitamentos de até 20 kW.

Com as mudanças estruturais no setor elétrico brasileiro, caracterizando o fim monopólio do Estado no setor elétrico, várias empresas investiram na elaboração de estudos e projetos de geração de energia renovável. Conforme a Associação Brasileira de Pequenas Centrais Hidrelétricas e Centrais Geradoras – ABRAPCH (2018), de 1997 até hoje, mais de R\$ 1 bilhão foram aplicados por investidores privados na elaboração e nos licenciamentos ambientais de mais de mil projetos de PCHs.

Conforme o BIG – Banco de Informações da ANEEL, em 29 de setembro de 2018, com relação a capacidade de geração de energia por PCHs, o Brasil possui um total de 426 empreendimentos em operação, totalizando 5.149.059 kW de potência instalada. Sendo que está previsto para os próximos anos uma adição de 1.885.048, proveniente dos 31 empreendimentos atualmente em construção e mais 113 empreendimentos com construção não iniciada. A tabela abaixo exemplifica a situação atual das PCHs no Brasil:

Tabela 2 – Capacidade de Geração das PCHs no Brasil

<b>Situação</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Potência Outorgada<sup>9</sup> (kW)</b>	<b>Potência Fiscalizada<sup>10</sup> (kW)</b>
Em operação	426	5.149.059	5.114.827
Em construção	31	397.209	-
Com construção não iniciada	113	1.487.839	-

Fonte: BIG ANEEL (2018)

### 5.1 Componentes de uma Pequena Central

Conforme Mauad (2004), uma PCH é formada por componentes básicos que envolvem desde o represamento até o canal de saída da água. Os principais componentes são: barragem, vertedouro, obras de adução, canal de fuga, tubulação forçada, chaminé de equilíbrio, casa de máquinas, turbina, gerador e tomada d'água.

<sup>9</sup> A Potência Outorgada é igual a considerada no Ato de Outorga.

<sup>10</sup> A Potência Fiscalizada é igual a considerada a partir da operação comercial da primeira unidade geradora.

- Barragem: Tem a função de criar um pequeno reservatório que irá permitir a instalação da tomada d'água. Podem ser construídas barragens de madeira, aterro de argila ou de outros materiais disponíveis.
- Vertedouro: Tem a função de conduzir até o leito do aproveitamento a vazão remanescente que ocorre na tomada d'água. Pela definição clássica, vertedores são orifícios cujo perímetro molhado é constituído por uma linha aberta que se assemelha a secção transversal de um canal de superfície livre (MAUAD, 2004).
- Obras de Adução: Tem a função de transportar a vazão de água da tomada d'água até a câmara de carga. Geralmente é um canal, mas podem ser túneis ou tubulações.
- Câmara de carga: É uma obra na qual são conectados condutos forçados, também chamada de castelo d'água. As dimensões devem assegurar que na tubulação forçada não entrará ar. A câmara deve ser dotada de uma comporta desarenadora para permitir a limpeza de material sólido e suavizar o golpe de aríete.

Se uma tubulação é fechada muito rapidamente por uma válvula, o movimento da coluna do líquido à montante da válvula de bloqueio é subitamente interrompido. A força da inércia produz um choque de pressão. O efeito de súbitas alterações de pressão (choques de pressão) em tubulações ou outros equipamentos é geralmente conhecido como golpe de aríete. Os esforços causados por tais choques de pressão são frequentemente muito maiores que os esforços aos quais os equipamentos estão normalmente sujeitos. A onda de choque, que viaja com a velocidade do som, pode causar deformações ou mesmo ruptura de equipamentos. Um golpe de aríete é reconhecido por ruídos violentos.

- Tubulação forçada: Tem a função de conduzir a água da câmara de carga (ou chaminé de equilíbrio) até a turbina. Devem ser ancorados para resistir a pressão exercida pela água e à dilatação que ocorre devido às mudanças de temperatura.
- Chaminé de equilíbrio: Tem como função amortecer os efeitos dos aumentos de pressão e velocidade da água no interior da tubulação forçada causados pelo golpe de aríete durante um acionamento rápido do dispositivo de fechamento da turbina. Tem também a função de armazenar a água que penetra no seu interior durante o refluxo resultante do aumento de pressão, liberando-a para a turbina quando o dispositivo de fechamento abrir novamente. É uma estrutura de eixo vertical com um reservatório cilíndrico implantada entre o trecho com a tubulação de baixa pressão e trecho com a tubulação de alta pressão.

Existem outros componentes das PCHs como as válvulas, presentes em todo o sistema hidráulico; as comportas e grades que barram detritos de entrarem nas tubulações e sistemas.

## 5.2 Classificação das Centrais quanto à capacidade de regularização

A Eletrobrás em suas Diretrizes para projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas (2000), classifica as PCHs quanto à capacidade de regularização do reservatório em:

- a Fio d'Água;
- de Acumulação, com Regularização Diária do Reservatório;
- de Acumulação, com Regularização Mensal do Reservatório.

### 5.2.1 PCH a fio d'água

Esse tipo de PCH é empregado quando as vazões de estiagem do rio são iguais ou maiores que a descarga necessária à potência a ser instalada para atender à demanda máxima prevista.

Nesse caso, despreza-se o volume do reservatório criado pela barragem. O sistema de adução deverá ser projetado para conduzir a descarga necessária para fornecer a potência que atenda à demanda máxima. O aproveitamento energético local será parcial e o vertedouro funcionará na quase totalidade do tempo, extravasando o excesso de água.

Esse tipo de PCH apresenta, dentre outras, as seguintes simplificações:

- dispensa estudos de regularização de vazões;
- dispensa estudos de sazonalidade da carga elétrica do consumidor; e
- facilita os estudos e a concepção da tomada d'água.

No projeto:

- não havendo flutuações significativas do NA do reservatório, não é necessário que a tomada d'água seja projetada para atender a depleções do NA;
- do mesmo modo, quando a adução primária é projetada através de canal aberto, a profundidade do mesmo deverá ser a menor possível, pois não haverá a necessidade de atender às depleções;

- pelo mesmo motivo, no caso de haver necessidade de instalação de chaminé de equilíbrio, a sua altura será mínima, pois o valor da depleção do reservatório, o qual entra no cálculo dessa altura, é desprezível;
- as barragens serão, normalmente, baixas, pois têm a função apenas de desviar a água para o circuito de adução;
- como as áreas inundadas são pequenas, os valores despendidos com indenizações serão reduzidos (CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S. A. – ELETROBRÁS, 2000).

Na imagem a seguir pode-se observar a PCH Mogi Guaçu, localizada no baixo vale do rio Pardo, região centro-leste de São Paulo, abrangendo os municípios de Mogi-Guaçu, Mogi-Mirim e Itapira. Essa usina opera a fio d'água desde 1994.

Figura 4 – PCH Mogi Guaçu



Fonte: Museu Virtual de Patrimônio Cultural – AES Tietê (2018)

### 5.2.2 PCH de acumulação, com regularização diária do reservatório

É utilizado esse tipo de PCH quando as vazões de estiagem do rio são menores que os valores necessários para fornecer a potência para suprir a demanda máxima dos consumidores. Nesse caso, o reservatório fornecerá o adicional necessário de vazão regularizada (ELETROBRÁS, 2000).

### 5.2.3 PCH de acumulação, com regularização mensal do reservatório

É utilizado esse tipo de PCH a partir da análise das vazões de estiagem média mensais, adotando-se então, uma regularização mensal das vazões médias diárias promovida pelo reservatório. Ou seja, o projeto de uma PCH desse tipo considera os dados de vazões médias mensais no seu dimensionamento energético (ELETROBRÁS, 2000).

## 5.3 Classificação das Centrais quanto ao sistema de adução

Quanto ao sistema de adução, são considerados dois tipos de PCH:

- adução em baixa pressão com escoamento livre em canal / alta pressão em conduto forçado;
- adução em baixa pressão por meio de tubulação / alta pressão em conduto forçado (ELETROBRÁS, 2000).

As condições topográficas e geológicas do local do aproveitamento serão avaliadas tecnicamente e então é escolhido o tipo de sistema de adução a partir de um estudo comparativo. Geralmente, um sistema de adução longo se configura como a solução mais econômica e é adotado quando a inclinação da encosta e as condições de fundação forem favoráveis à construção de um canal. Já no caso de um sistema de adução curto, a opção por tubulação única, para os trechos de baixa e alta pressão, deve ser estudada. Ainda deve ser considerado nos estudos a necessidade de se instalar uma chaminé de equilíbrio.

## 5.4 Classificação das Centrais quanto à potência instalada e quanto à queda de projeto

Talvez essa seja a classificação mais importante, pois são esses fatores que definem uma PCH enquanto tal. Dessa, forma a Eletrobrás (2000) apresenta nas Diretrizes para projetos de PCH, a classificação quanto à potência instalada e quanto à altura de queda do projeto avaliado

conforme a tabela 3, considerando os dois parâmetros em conjunto, garantindo uma classificação adequada.

Tabela 3 - Classificação das PCHs quanto à Potência e quanto à Queda do Projeto

Classificação das Centrais	Potência P (kW)	Queda do Projeto - $H_d$ (m)		
		Baixa	Média	Alta
<b>Micro</b>	$P < 100$	$H_d < 15$	$15 < H_d < 50$	$H_d > 50$
<b>Mini</b>	$100 < P < 1.000$	$H_d < 20$	$20 < H_d < 100$	$H_d > 100$
<b>Pequenas</b>	$1.000 < P < 30.000$	$H_d < 25$	$25 < H_d < 130$	$H_d > 130$

Fonte: Eletrobrás (2000).

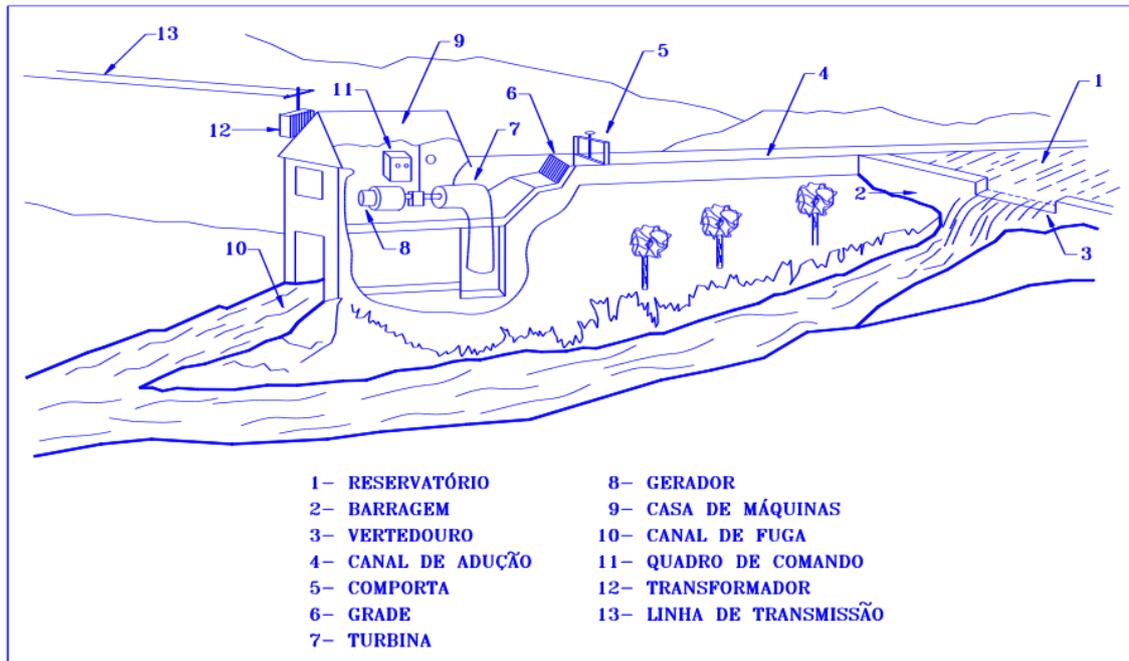
## 5.5 Tipos de Arranjos de Pequenas Centrais Hidrelétricas

Conforme a Apostila de Aproveitamentos Hidrelétricos do Prof. Frederico Fábio Mauad (2004), as Pequenas Centrais apresentam uma estrutura básica com componentes elementares que têm como função captar e conduzir a água até a casa de máquinas, onde ocorrerá a conversão de energia mecânica para elétrica, e um canal que fará a restituição da água ao rio.

### 5.5.1 Pequena Central de baixa queda

Consiste em um arranjo projetado para baixas quedas, até 3 metros. Nesse típico arranjo, conforme a figura 5, um canal de adução dotado de uma câmara de carga conduz a água diretamente para a turbina na casa de máquinas.

Figura 5 – Arranjo típico para PCHs de baixa queda



Fonte: Mauad (2004).

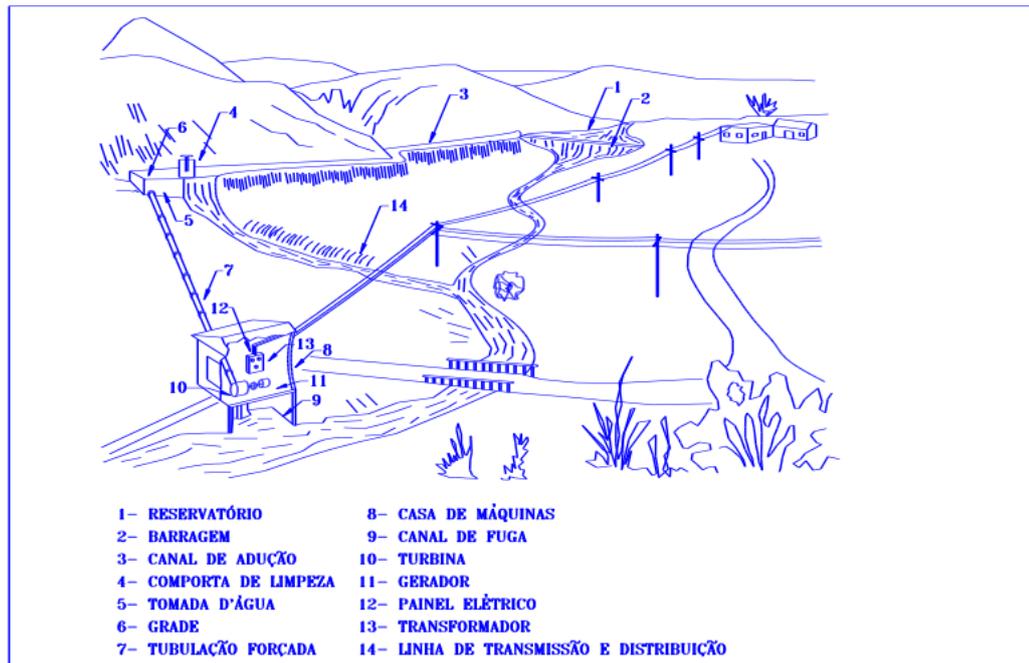
### 5.5.2 Pequena Central afastada da queda

Este arranjo se dá principalmente em pequenas centrais em que a casa de máquinas se localiza longe da cachoeira, visando otimizar o aproveitamento da queda. Pode ser um canal de adução, dotado de uma câmara de carga que é então conectada à casa de máquinas por tubulações.

### 5.5.3 Pequena Central afastada da queda sem canal

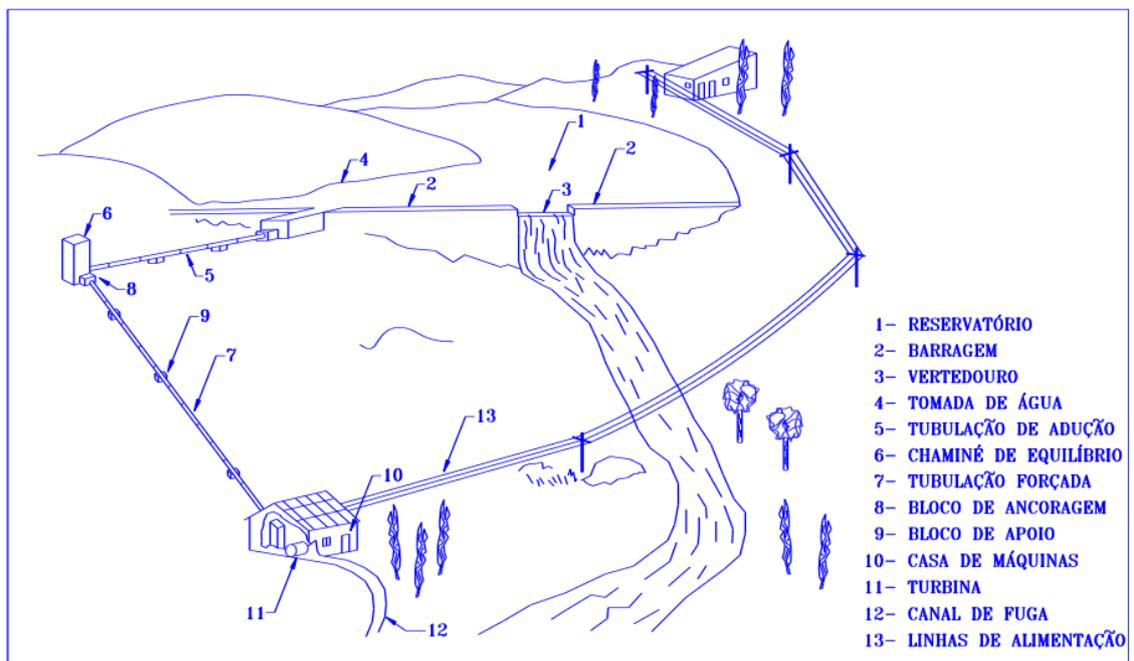
Este arranjo é utilizado quando a barragem está consideravelmente distante da casa de máquinas de forma a inviabilizar a construção de um canal ao longo da encosta. Conforme a figura a seguir, pode ser uma tubulação de adução ligada a uma chaminé de equilíbrio, e então, a chaminé é conectada a casa de máquinas por outras tubulações.

Figura 6 – Arranjo típico de uma PCH afastada da queda



Fonte: Mauad (2004).

Figura 7 – Arranjo típico de uma PCH afastada da queda, quando não é possível adotar um canal

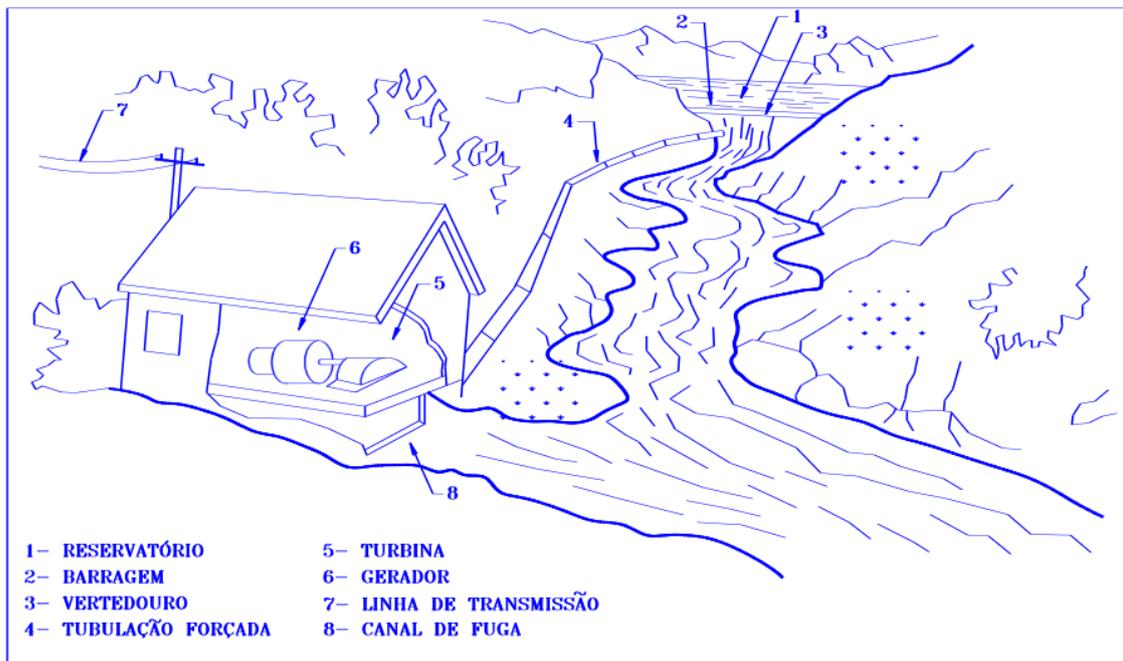


Fonte: Mauad (2004).

### 5.5.4 Pequena Central com alta queda e próxima da barragem

Consiste em um arranjo projetado para quedas superiores a 3 metros e a distância entre a barragem ou a tomada d'água e casa de máquina é relativamente pequena. A pequena central pode então ser projetada com uma tubulação ligada diretamente da barragem à casa de máquinas.

Figura 8 – Arranjo Típico para PCH com alta queda e próxima da barragem



Fonte: Mauad (2004).

### 5.6 Análise de Hidrometria

O estudo de viabilidade de um projeto de aproveitamento leva em consideração o comportamento do rio na qual pretende-se instalar uma central hidrelétrica. É fundamental observar a vazão do rio, para determinar o potencial hidráulico disponível e então a potência a ser instalada.

Para se ter precisão na determinação das vazões dos rios, faz-se várias medidas em dias distintos. Tais medidas devem ser feitas preferencialmente em períodos de seca, quando o nível da água é mínimo. Assim, adota-se a vazão mínima como sendo representativa da vazão de projeto da turbina (MAUAD, 2004).

Existem vários métodos para se medir a vazão; alguns bem simples, outros extremamente complexos. Sendo que conforme método e dos equipamentos utilizados pode-se ter medidas mais ou menos precisas. No entanto, para os projetos de PCHs alguns métodos práticos fornecem resultados satisfatórios.

De acordo com a Apostila de Aproveitamentos Hidráulicos (MAUAD, 2004), os principais métodos são:

- Método do Flutuador;
- Método do Trapézio;
- Método do Retângulo;
- Método do Molinete;
- Método do Flutuador Integrador;
- Método dos Vertedores (Vertedor Triangular de 90 graus e Vertedor Regular);
- Vazão da Cheia.

### 5.7 Análise do Terreno

Para instalar uma PCH é preciso uma análise do terreno; é necessário conhecer a queda disponível, escolher a melhor localização para as obras da barragem, do sistema de adução e da casa de máquinas. Além disso, é preciso também determinar a área a ser inundada.

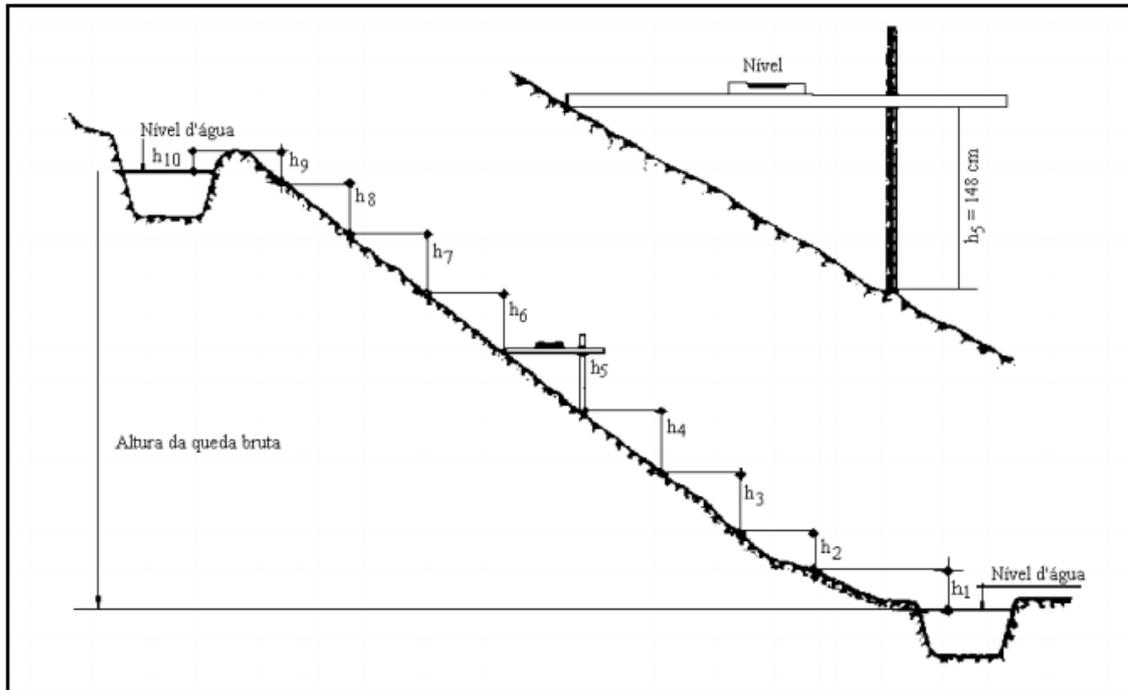
Para medir a queda d'água são utilizados métodos de nivelamento. Dois métodos são apresentados a seguir nas figuras 9 e 10 conforme Mauad (2004).

A figura 9 exemplifica um método relativamente simples utilizando duas réguas perpendiculares entre si, ajustadas conforme um nível. A queda d'água é determinada geometricamente, pela soma das diferenças de alturas de sucessivas medições.

Já a figura 10 exemplifica um método utilizando régua e um tubo plástico (mangueira). A mangueira com uma pequena quantidade de líquido garante que as medidas aconteçam em um mesmo nível, através do paradoxo hidrostático. A altura de queda bruta é também determinada pelo somatório das diferenças das alturas das sucessivas medições.

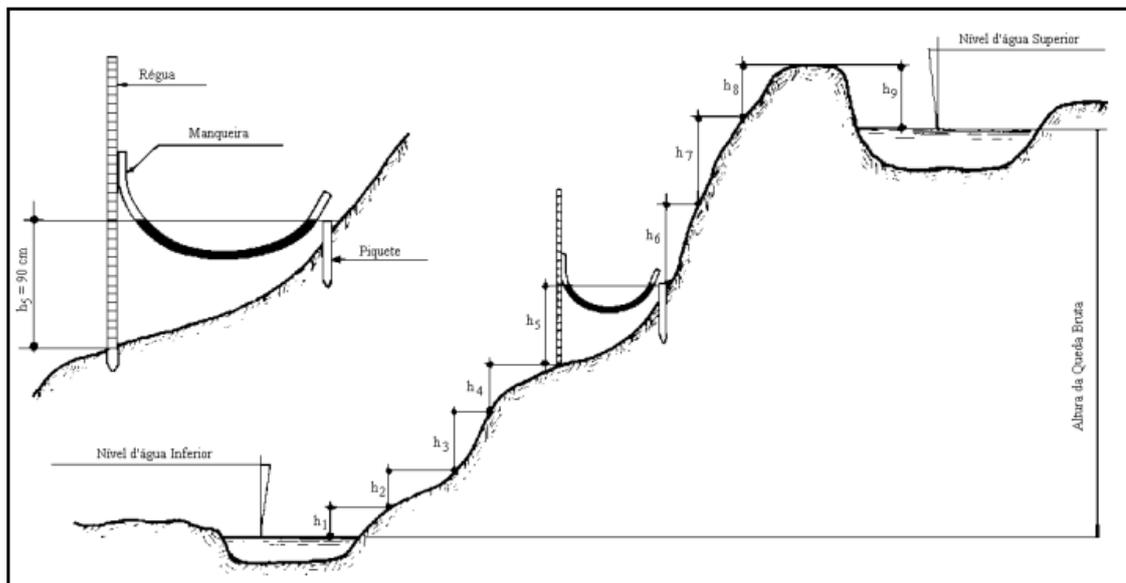
Em um projeto de PCH, além da altura de queda d'água também é calculada a área a ser alagada e um estudo geológico dos solos. Deve ser executada uma prospecção sobre as características dos solos de modo a amenizar riscos quanto a recalques, infiltrações, desmoronamento e assoreamento. Locais onde há probabilidade de desmoronamento não oferecem boas condições de suporte de obras.

Figura 9 – Medição da queda por meio de duas réguas e um nível



Fonte: Mauad (2004).

Figura 10 – Determinação da queda natural com régua e tubo plástico



Fonte: Mauad (2004).

Não é recomendável a construção de PCHs em terrenos desmatados onde a vegetação seja rala ou inexistente associados a costas íngremes pois esses locais podem sofrer erosão na

época de chuvas. Além disso pode ocorrer sedimentação, o reservatório pode ficar sujeito a uma grande disposição de material em pouco tempo, o que inviabiliza esses projetos.

### 5.8 Potência Disponível Bruta

Conforme Mauad (2004), a potência disponível bruta no local a ser instalada a PCH é:

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \text{ (W)} \quad (2)$$

Em que:

- $P$  : Potência disponível, ou bruta (W);
- $\rho$  : massa específica da água ( $\text{kg/m}^3$ );
- $g$  : aceleração da gravidade local ( $\text{m/s}^2$ );
- $Q$  : vazão medida ( $\text{m}^3/\text{s}$ );
- $H$  : altura de queda bruta (m);

Ao adotar  $\rho$  como  $1.000 \text{ kg/m}^3$  e  $g$  como  $9,81 \text{ kg/m}^3$ , tem-se:

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H \text{ (W)} \quad (3)$$

### 5.9 Potência Instalada

A potência instalada é a potência diminuída das perdas que ocorrem na adução, encanamento, turbina e gerador. Assim a potência instalada é a potência possível de ser transformada em mecânica:

$$P_i = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_l \cdot \eta \text{ (kW)} \quad (4)$$

Em que:

- $P_i$  : Potência instalada (kW)
- $\eta$  : rendimento total da instalação, sendo:

$$\eta = \eta_g \cdot \eta_t \quad (5)$$

- $\eta_g$  : rendimento do gerador;
- $\eta_t$  : rendimento da turbina;
- $H_l$  : altura de queda líquida, sendo:

$$H_l = H - h_p \quad (6)$$

- $h_p$  : perdas que ocorrem no sistema de adução. Pode-se considerar  $h_p$  como 5% da altura de queda bruta (MAUAD, 2004).

O Manual de Pequenas Centrais Hidrelétricas da Eletrobrás, conforme Mauad (2004), indica a seguinte fórmula:

$$P_i = 6,80 \cdot Q \cdot H \quad (7)$$

No entanto, essas considerações são muito difíceis de serem obtidas, pois seria necessário um rendimento da turbina em torno de 81%.

A tabela 4 lista as possibilidades das análises da potência instalada em relação a potência necessária (desejada) do projeto:

Situação	Ações
$P_d < P_n$	Ajuste da vazão ou tentar vender o excedente
$P_d \cong P_n$	Aproveitar toda a potência
$P_d > P_n$	Racionar o consumo e complementar o déficit com outras fontes

Fonte: Mauad (2004).

## 5.10 Turbinas e Geradores

As turbinas hidráulicas são equipamentos que transformam a energia hidráulica em energia mecânica em seu eixo. Um gerador é conectado diretamente nesse eixo com a função de converter a energia mecânica em energia elétrica (PEREIRA, 2015).

As turbinas hidráulicas utilizadas nas pequenas centrais hidrelétricas devem ser escolhidas visando se obter facilidade de operação e manutenção, dando-se grande importância à sua robustez. A turbina escolhida deve apresentar a melhor solução técnica e econômica, levando em consideração sua confiabilidade.

Além desses parâmetros, deve-se analisar se há a possibilidade de fornecimento de peças e atendimento imediato em caso de problemas por parte do seu fabricante.

A rotação da turbina depende de quatro variáveis: a altura de queda disponível; o valor da potência nominal; o tipo de turbina e do gerador a ser utilizado.

Os geradores têm por função converter a energia mecânica fornecida pela turbina em energia elétrica. Os geradores utilizados em PCHs podem ser assíncronos ou síncronos. Sendo os síncronos podem apresentar ou não multiplicadores de velocidade.

A velocidade de rotação para geradores assíncronos e síncronos sem multiplicador é a mesma para a turbina e, sendo assim, deve-se procurar a velocidade síncrona mais próxima da calculada (conforme fórmulas típicas para cada tipo de turbina).

Essa velocidade é dada por:

$$n = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (8)$$

Em que:

- $n$  : velocidade de rotação síncrona (rpm);
- $f$  : velocidade da rede (Hz);
- $p$  : número de pólos do gerador.

Se o gerador possuir multiplicador de velocidade, deve-se manter a velocidade calculada de rotação da turbina, mesmo que o resultado não corresponda à uma velocidade síncrona. O multiplicador de velocidade fará o ajuste para a velocidade síncrona (ELETROBRÁS, 2000).

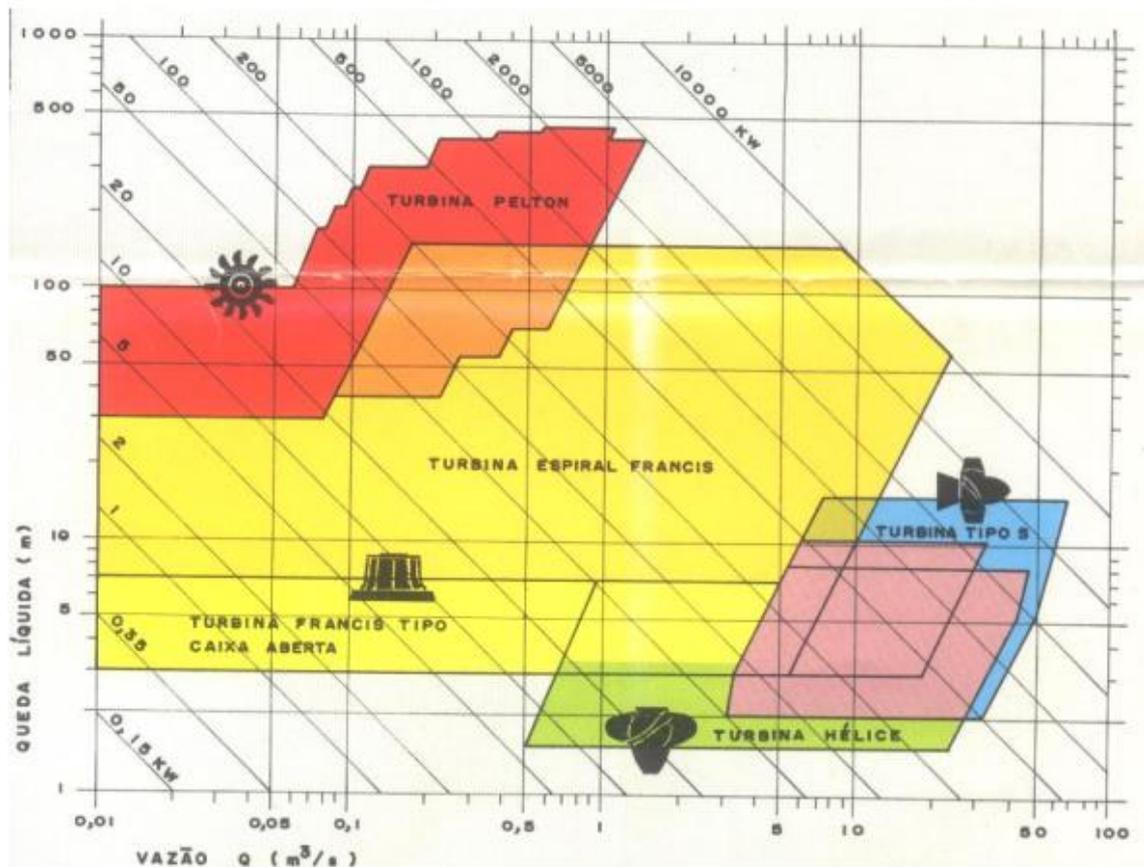
Basicamente, existem dois tipos de turbinas hidráulicas: as de ação e as de reação. Nas turbinas de ação, a energia hidráulica disponível é transformada em cinética pura para depois incidir nas pás do rotor, e transformar-se em mecânica: tudo isto ocorre a pressão atmosférica. Já na turbina de reação, o rotor é completamente submerso na água, com o escoamento da água ocorre uma diminuição de pressão e de velocidade entre a entrada e a saída do rotor. Tradicionalmente, as turbinas do tipo Pelton são as mais utilizadas, com um ou mais jatos, no caso das máquinas de ação; e as dos tipos Francis, Hélice e Kaplan, no caso do tipo de reação.

### 5.10.1 Seleção de Turbinas

A escolha da turbina leva em consideração a queda líquida e a vazão do projeto por turbina em m<sup>3</sup>/s, conforme o ábaco da figura 11.

A potência na saída pode ser estimada a partir do gráfico, interpolando-se os valores das linhas oblíquas.

Figura 11 – Ábaco de seleção do tipo de turbina



Fonte: Mauad (2004).

Conforme as Diretrizes da Eletrobrás (2000), a partir desses dados é possível determinar a velocidade específica da turbina, parâmetro importante para o dimensionamento pela fórmula:

$$n_s = \frac{n P_n^{0,5}}{H_{líq}^{1,25}} \quad (9)$$

Em que:

- $n_s$  : velocidade específica da turbina;
- $n$  : velocidade de rotação da turbina (rpm);
- $P_n$  : potência nominal da turbina (kW);
- $H_{líq}$  : queda líquida (m).

A norma NBR 12591 – Dimensões Principais de Turbinas para PCH, utiliza o conceito de velocidade específica calculada através da queda e vazão nominal pela equação a seguir:

$$N_{qr} = \frac{nQ_r^{0,5}}{H_r^{0,75}} \quad (10)$$

Em que:

- $N_{qr}$  : velocidade específica da turbina;
- $n$  : velocidade de rotação da turbina (rpm);
- $Q_r$  : vazão garantida ou nominal (m<sup>3</sup>/s);
- $H_r$  : altura de queda nominal (m).

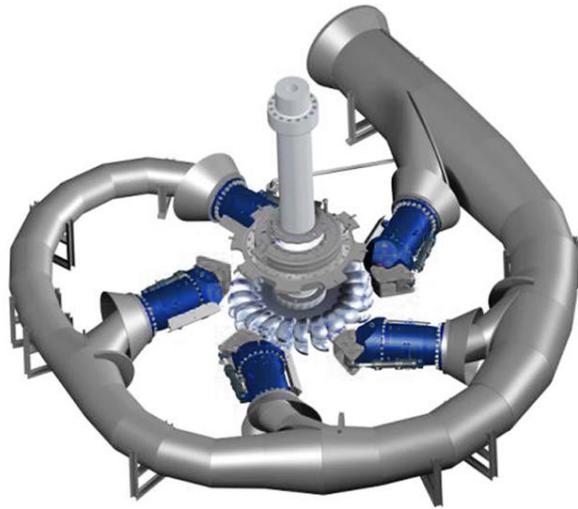
Em alguns casos, as condições e parâmetros apresentados permitem que seja selecionado mais de um tipo de turbina, devendo a escolha final ser feita, nesse caso, após consulta a diversos fabricantes especializados.

A potência indicada pelo gráfico corresponde à saída do gerador e supõe um rendimento constante para o conjunto turbina-gerador da ordem de 85%, conforme a equação (4).

### 5.10.2 Turbina Pelton

A Pelton se caracteriza por um rotor com pás ou conchas na periferia e por uma tubulação de adução alimentando um ou mais injetores. Além disso, é aconselhável utilizar um defletor de água, colocado à frente de cada jato, que poderá ser do tipo aberto/fechado ou do tipo de regulação contínua, esse último necessário em casos de rede isolada (ELETROBRÁS, 2000).

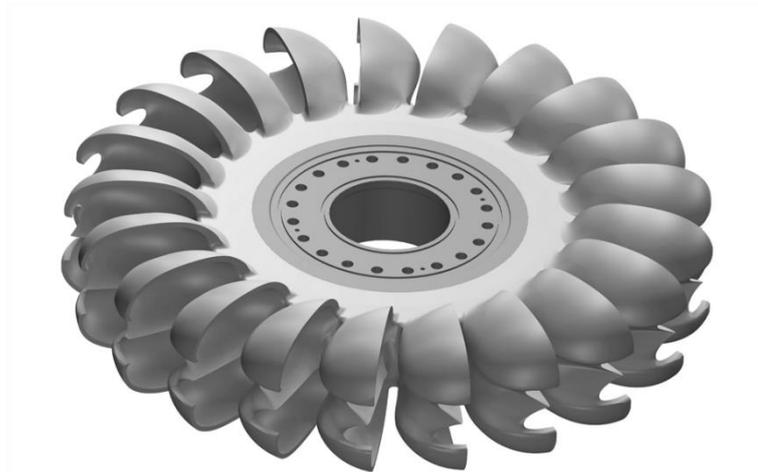
Figura 12 – Turbina Pelton



Fonte: Voith (2018).

O rotor, peça de fundamental importância, pode ser construído a partir de uma peça única em aço inoxidável, integralmente fundida, com as conchas dispostas em sua periferia e posteriormente usinada.

Figura 13 – Rotor Pelton



Fonte: Voith (2018).

Conforme as Diretrizes da Eletrobrás (2000), para as PCHs, as turbinas Pelton são indicadas para alturas de queda entre 100 e 500 metros (atendendo alguns casos excepcionais até 1000 metros) e potências entre 500 e 12.500 kW.

### 5.10.3 Turbinas Francis

As turbinas Francis são equipamentos complexos com elevada eficiência. Neste tipo de turbina, a água é submetida a um turbilhonamento adicional através de um tubo em hélice e, então, direcionada para as pás curvas do estator que giram no sentido contrário. O desempenho da turbina é mantido constante com o auxílio de pás guias também em caso de alteração de carga e níveis alternados de água. O rotor da turbina Francis é normalmente feito em uma única peça fundida e usinada. É vantajoso prever o rotor em aço inoxidável fundido, onde a qualidade e a garantia de menor manutenção compensam o custo maior.

Figura 14 – Pás Francis



Fonte: Walter Tools (2018).

#### 5.10.3.1 Turbina Francis com caixa espiral

É uma turbina de reação, caracterizada pela transformação da energia potencial de queda em mecânica no rotor da turbina. Possui uma caixa espiral em aço ligado em lado montante a um conduto forçado. E na periferia interna da caixa espiral, um anel rígido suporta as pás fixas de pré-distribuidor.

No âmbito destas Diretrizes, a turbina Francis atende a quedas de 15 a 250 m e potências de 500 a 15000 kW possuindo ótimas características de desempenho sob cargas parciais de até 70% da carga nominal, funcionando

ainda adequadamente entre 70 e 50 % da carga, embora com perda progressiva do rendimento. Não é aconselhável o funcionamento da turbina abaixo de 50% da vazão nominal, devendo ser consultado o fabricante. (ELETROBRÁS, 2000).

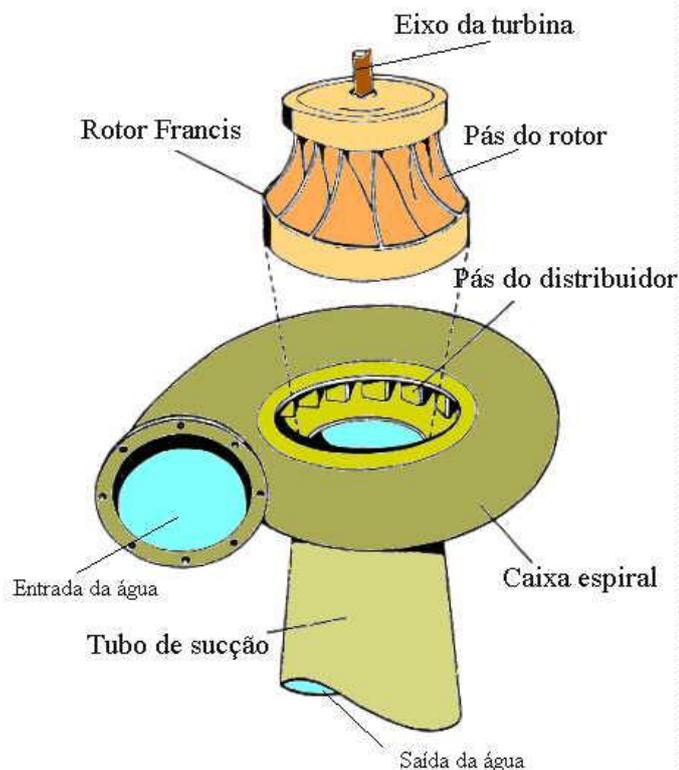
### 5.10.3.2 Turbina Francis com caixa aberta

A turbina Francis Caixa Aberta é viável para baixas quedas até 10 m e potências de 500 a 1800 kW (ELETROBRÁS, 2000).

Essas turbinas apresentam o rotor, o distribuidor e, eventualmente, o tubo de sucção situados dentro de uma câmara em comunicação direta com a tomada d'água, dispensando a existência de conduto e caixa espiral.

A câmara é normalmente construída em concreto e o tubo de sucção em chapas de aço em forma de cone. A ausência de conduto forçado e de caixa espiral simplificam a concepção e diminuem o custo do equipamento.

Figura 15 – Esquema de funcionamento de uma turbina Francis de eixo vertical



Fonte: Mello Jr. (2018).

### 5.10.3.3 Turbina Francis dupla

São variantes das turbinas já descritas. A característica da Francis dupla é o rotor duplo, em que uma peça com uma única coroa, duas cintas e dois conjuntos de pás dividem a vazão afluente em duas partes.

### 5.10.4 Turbina S

Essa turbina é chamada assim chamada por ter o tubo de sucção em forma de “S”, pode ser colocada na posição de eixo horizontal ou menos frequentemente utilizada na posição inclinada. Utilizando o rotor Kaplan de pás reguláveis apresenta ótimas características de operação.

Figura 16 – Pás Kaplan



Fonte: Walter Tools (2018).

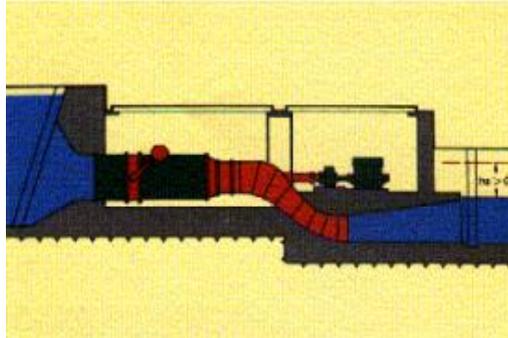
Possui um eixo que se prolonga através da blindagem metálica, permitindo que o gerador e eventual multiplicador de velocidade se situem fora da passagem hidráulica, normalmente mais a jusante. A extensão do eixo de ligação entre rotor e gerador, colocado diretamente no fluxo de água, é uma razão para diminuição do rendimento da unidade.

A disposição do conjunto de geração leva ao arranjo de uma casa de força com vão grande, com influência direta no peso e preço da ponte rolante.

A turbina Tubular “S” atende a quedas de 4 a 25 m e potências de 500 a 5000 kW para vazões de até 22,5 m<sup>3</sup>/s (ELETROBRÁS, 2000).

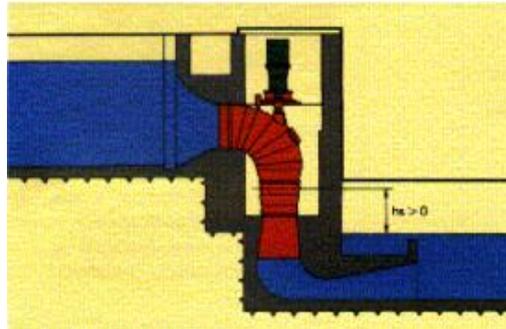
As figuras a seguir exemplificam três configurações da turbina S.

Figura 17 – Turbina Kaplan “S” jusante



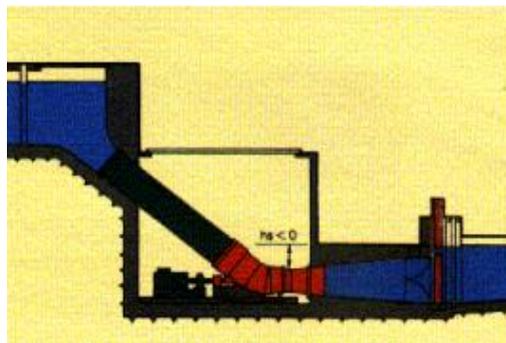
Fonte: Alstom no Brasil (2018).

Figura 18 – Turbina Kaplan “S” saxo



Fonte: Alstom no Brasil (2018).

Figura 19 – Turbina Kaplan “S” montante



Fonte: Alstom no Brasil (2018).

### 5.10.5 Turbina Bulbo com multiplicador

Essa turbina é utilizada como alternativa a turbina tubular “S”, nela um multiplicador de velocidade com engrenagens cônicas é incluído, o que permite que o gerador fique com o eixo a 90 graus do eixo da turbina, geralmente na vertical. A turbina é, de preferência, do tipo Kaplan com pás móveis. A utilização de turbina com pás fixas (tipo hélice) elimina a flexibilidade de operação com vazões abaixo de 80% da vazão nominal.

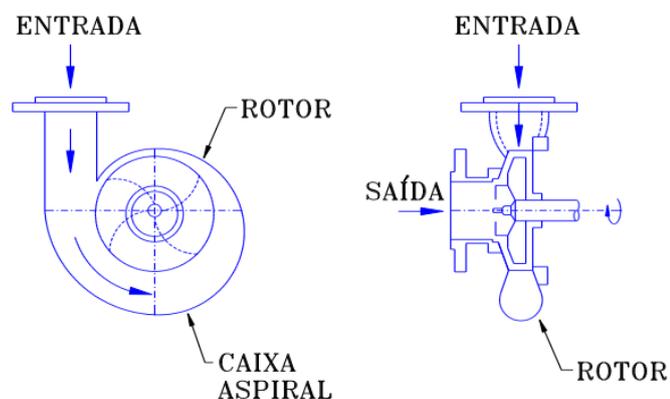
A turbina Bulbo com Multiplicador atende a quedas de 4 a 12 m e potência até 1700 kW (ELETROBRÁS, 2000).

### 5.10.6 Outras Turbinas

O Manual da Eletrobrás ainda cita outros tipos de turbinas como a turbina de fluxo transversal (Michell-Banki) para usinas com potências bem baixas, e a turbina Straflo de fluxo axial que possui o gerador disposto em sua periferia.

Ainda existe o uso de bombas aplicadas para funcionarem como turbinas. É uma solução de baixíssimo custo e apresenta um resultado satisfatório. O funcionamento consiste em fazer a água descer a tubulação e passar pelo rotor da bomba centrífuga, dessa forma faz com que o mesmo gire e opere como se fosse uma turbina (MAUAD, 2004). O uso da bomba funcionando como turbina (B.F.T.) mostra-se altamente adequado para geração de potências inferiores a 50 kW com a instalação trabalhando a plena carga.

Figura 20 – Bomba centrífuga funcionando como turbina



Fonte: Mauad (2004).

Pensando que o projeto de inserção de PCHs na matriz energética visa o desenvolvimento sustentável, existem aprimoramentos mais recentes da tecnologia e com isso o desenvolvimento de novos tipos de turbina, como turbinas com aeração, turbina Alden e rotores com folgas mínimas.

#### 5.10.6.1 Rotores com folgas mínimas

Turbinas com palhetas ajustáveis com as do tipo Kaplan ou Bulbo apresentam o passo variável. Esses mecanismos apresentam folgas nas periferias interiores e exteriores das palhetas. Essas folgas podem provocar fluxos em virtude de vazamentos, o que leva à formação de vórtices. Tais fluxos secundários provocam o aumento da velocidade da água, variações de pressão intensas e rápidas, e níveis reduzidos de pressão absoluta, sendo todos esses fatores potencialmente nocivos à passagem de peixes.

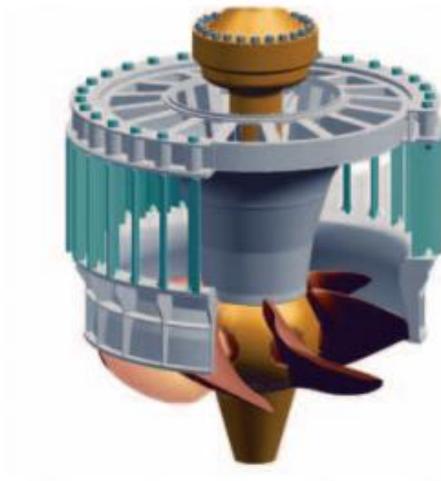
A Voith desenvolveu a tecnologia *Minimum Gap Runner* (MGR, ou rotor com folga mínima) como parte integrante do programa *Advanced Hydro Power Turbine System* (AHTS, ou Sistema de turbina hidrelétrica avançado) do Departamento de Energia dos EUA. As palhetas MGR visam manter a folga do projeto constante durante o curso de movimento delas, isso aumenta a sobrevivência dos peixes e impacta positivamente na eficiência da turbina. A figura a seguir apresenta esses mecanismos que têm um perfil que ajusta ao contorno esférico do cubo e da periferia (VOITH, 2018).

Conforme a Voith, a taxa de sobrevivência dos peixes em projetos com esses rotores apresentam valores superiores a 95%.

#### 5.10.6.2 Turbina Alden

Essas turbinas foram projetadas para permitir a passagem de peixes assegurando a melhoria das taxas de sobrevivência de peixes. As turbinas levam esse nome pois foram desenvolvidas no *Alden Research Laboratory* (EUA). Elas possuem uma menor velocidade de rotação e apenas três pás. Foram feitas diminuindo o corte e as taxas de variação de pressão durante a passagem da água, assim reduzem a probabilidade de choque graças à otimização da quantidade de pás. Essa turbina apresenta um perfil geométrico otimizado para atender aos critérios estabelecidos para a passagem dos peixes conforme pode ser visto na figura 22 a seguir.

Figura 21 – Esquema de Turbina Kaplan MGR (rotor com folga mínima)



Fonte: Voith (2018).

Figura 22 – Turbina Alden



Fonte: Voith (2018).

### 5.10.6.3 Cubos sem óleo

Os cubos dos rotores de palhetas ajustáveis geralmente estão cheios de óleo pressurizado. Esse óleo tem a função de lubrificar tanto os mancais dos munhões que sustentam as palhetas do rotor quanto as peças deslizantes do mecanismo das pás. O problema é que o uso de óleo pode poluir a água caso ocorram vazamentos.

A substituição de óleo pressurizado por materiais autolubrificantes assegura não apenas a prevenção de vazamentos acidentais no meio ambiente mas também assegura uma manutenção facilitada, reduzindo o atrito e garante uma melhora no desempenho dos mancais sem que seja necessário aumentar o tamanho do servomotor.

Figura 23 – Cubos sem óleo



Fonte: Voith (2018).

A alta eficiência das turbinas hidráulicas, bem como o desenvolvimento de tecnologias *Eco-friendly*, que visam reduzir os impactos ambientais, apontam que o caminho a seguir para se obter o desenvolvimento sustentável é através da geração hidráulica, principalmente das pequenas centrais.

### 5.11 Etapas dos projetos de PCH

Conforme a ANEEL (2018), nos termos da Resolução Normativa nº 673, de 4 de agosto de 2015, são apresentados os requisitos e procedimentos para a obtenção de outorga de

autorização para exploração, e gestão da outorga, de aproveitamento de potencial hidráulico com características de Pequena Central Hidrelétrica - PCH.

Nessa parte, será discorrido acerca das etapas do processo de implementação de PCHs de forma sucinta, sendo que o objetivo desse trabalho não é traçar um guia de implementação de projetos de PCHs, mas visa analisar a ampliação da participação delas na matriz energética. Dessa forma:

- Estudos de inventário: São estudos de engenharia que têm por objetivo definir o potencial hidrelétrico de uma determinada bacia hidrográfica, a partir da análise de divisão de quedas d'água e da definição ótima desse potencial.

O início do projeto ocorre com os estudos do inventário, só depois que esses estudos estiverem concluídos, a ANEEL concede registro para iniciar os estudos de viabilidade técnica e econômica. Ao passo que também ocorrem os estudos socioambientais paralelamente ao processo de licenciamento ambiental. Cabe ao empreendedor obter a licença prévia junto aos órgãos ambientais, IBAMA ou entidades estaduais. Assim como também é necessária a Declaração de Reserva de Disponibilidade Hídrica – DRDH, obtida junto a Agência Nacional de Águas – ANA ou outros órgãos gestores de recursos hídricos.

- Projeto Básico: Essa etapa compreende um maior detalhamento nos estudos de inventário. É necessário a licença prévia; uma vez tendo a autorização pelo poder concedente para instalar o empreendimento deverá solicitar ao órgão ambiental a licença de instalação para poder iniciar a construção. Depois ainda será necessário a licença de operação para que a usina comece a gerar de forma comercial.

A competência para considerar o empreendimento apto a ser licitado é do Ministério de Minas e Energia – MME, bem como definir qual tipo de leilão pelo qual será negociada a concessão e também vendida a energia gerada. A partir daí, cabe a ANEEL propor a minuta de edital de licitação de acordo com as diretrizes definidas pelo MME.

- DRDH: Conforme ANA (2018):

Os aproveitamentos hidrelétricos que demandam quantidades importantes de recursos hídricos e podem impactar de forma significativa a disponibilidade de água são analisados, outorgados e fiscalizados de forma diferenciada pela Agência Nacional de Águas.

Nos aproveitamentos hidrelétricos dois bens públicos são objeto de concessão pelo poder público: o potencial de energia hidráulica e a água. Anteriormente à licitação da concessão ou à autorização do uso do potencial

de energia hidráulica, a autoridade competente do setor elétrico deve obter a Declaração de Reserva de Disponibilidade Hídrica - DRDH junto ao órgão gestor de recursos hídricos. Posteriormente, a DRDH é convertida em outorga em nome da entidade que receber, da autoridade competente do setor elétrico, a concessão ou autorização para uso do potencial de energia hidráulica, conforme disposições dos Arts. 7º e 26º, da Lei 9.984, de 2000, Art. 23º do Decreto nº 3.692, de 2000, e Art. 9º da Resolução CNRH nº 37, de 2004. No caso de corpos de água de domínio da União, a ANA emite a DRDH e a converte em outorga conforme os procedimentos estabelecidos na Resolução da ANA nº 131/2003.

Em rios de domínio dos Estados ou do Distrito Federal, o respectivo órgão gestor de recursos hídricos é o responsável pela emissão da Declaração de Reserva de Disponibilidade Hídrica.

Por ser um processo mais simples, um projeto de PCH dispensa o estudo de viabilidade, podendo o empreendedor iniciar diretamente o projeto básico. Em anexo estão fluxogramas de procedimentos que constam nas Diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas da Eletrobrás (2000).



## 6 MATRIZ ENERGÉTICA

O último relatório do Ministério de Minas e Energia sobre a Energia no Mundo apresenta dados com base no Balanço Energético Nacional 2017 (ano base 2016) nas análises para o Brasil e, para os demais países e regiões, dados da IEA (Agência Internacional de Energia) e estatísticas de 2016 da BP Energy (*British Petroleum*). Consolidando os resultados, o MME apresenta os seguintes itens:

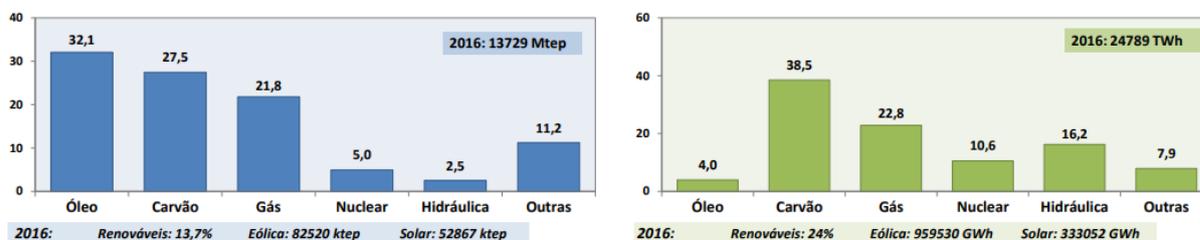
- Matriz Energética: É a demanda total de energia de um país ou região, segmentada por fonte.
- Demanda Total de Energia: Energia necessária para movimentar a economia de um país ou região. Também denominada de Oferta Interna de Energia (OIE).
- Matriz Elétrica: Geração total de energia elétrica de um país ou região, segmentada por fonte.

Sendo que as fontes energéticas são:

- Óleo: Petróleo e seus derivados.
- Carvão: Carvão mineral bruto, de diferentes tipos, e seus derivados.
- Gás: Gás Natural.
- Hidráulica: Total de energia hidráulica gerada por um país ou região, incluindo comércio externo de eletricidade.
- Outras: Fontes alternativas tais como Biomassa, Biodiesel, Eólica, Solar, Geotérmica, Outras Renováveis (Marés, Ondas, etc.) e Outras Não-Renováveis (Gás Industrial, etc).
- Renováveis: Somatório das energias renováveis alternativas incluídas em “Outras” e da energia “Hidráulica”.
- Solar: Na matriz energética são somadas as fontes classificadas como “Solar Térmica” e “Solar Fotovoltaica”, e na matriz elétrica apenas “Solar Fotovoltaica” é considerada.

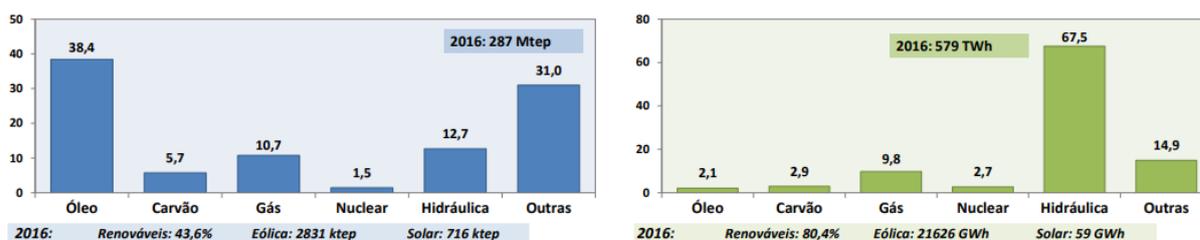
O documento apresenta, para a análise mundial, OECD<sup>11</sup>, países não-OECD e oitenta e nove países, as matrizes energética e elétrica, suas estruturas de fontes fósseis, fontes renováveis e energia nuclear em tep<sup>12</sup>.

Figura 24 – Matriz Energética (%) em azul e Matriz Elétrica (%) em verde - Mundo 2016



Fonte: Brasil - MME (2017).

Figura 25 – Matriz Energética (%) em azul e Matriz Elétrica (%) em verde - Brasil 2016



Fonte: Brasil - MME (2017).

A análises das matrizes energéticas são importantes pois consolidam a estrutura de oferta de energia. No aspecto socioeconômico de desenvolvimento há uma correlação entre a produção de energia e o crescimento econômico.

As análises do consumo e da demanda de energia são feitas levando em consideração o desempenho das atividades produtivas de um país ou região ao longo dos anos. O consumo de energia se configura como um dos principais indicadores do desenvolvimento e do nível de qualidade de vida em uma sociedade. Ele reflete o ritmo de atividade dos setores produtivos –

<sup>11</sup> OECD: Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico. São países membros: Alemanha, Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, Chile, Coreia do Sul, Dinamarca, Espanha, Eslováquia, Eslovênia, Estônia, Estados Unidos, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Irlanda, Islândia, Israel, Itália, Japão, Luxemburgo, México, Noruega, Nova Zelândia, Países Baixos, Polônia, Portugal, Reino Unido, República Tcheca, Suécia, Suíça e Turquia.

<sup>12</sup> tep: A tonelada equivalente de petróleo (tep) é a unidade comum, adotada internacionalmente para somar os quantitativos de diferentes fontes de energia. A razão entre o poder calorífico inferior (PCI) de cada forma de energia e o PCI do petróleo, de 10.000 kcal/kg, determina o fator de conversão de unidades comerciais (m<sup>3</sup>, t, GWh etc.) para tep (BRASIL, 2017).

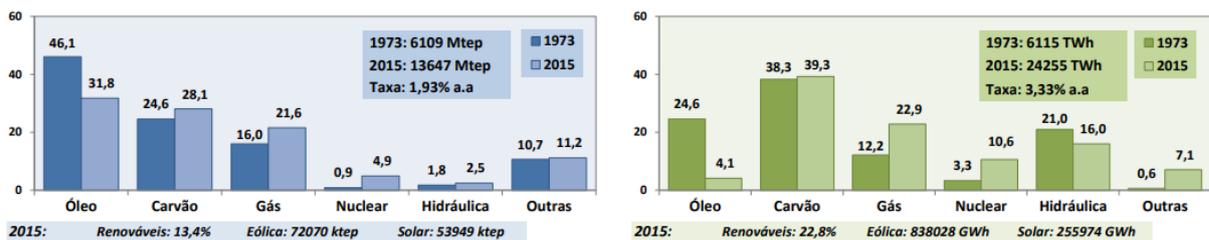
industrial, comercial, serviços, entre outros. Assim, o setor de energia é vital para o desenvolvimento.

A partir da compreensão da evolução das matrizes energéticas, é possível traçar cenários prospectivos que visam otimizar o aproveitamento dos recursos pelos sistemas de energia, analisar tendências mundiais e fazer projetos de expansão da oferta de energia. Com estudos aprofundados das matrizes pode-se orientar as decisões estratégicas dos setores públicos e privados no contexto do suprimento e conversão de energia.

É notável principalmente, um forte aumento do consumo de eletricidade e do consumo per capita, justificada pela universalização do crescimento econômico.

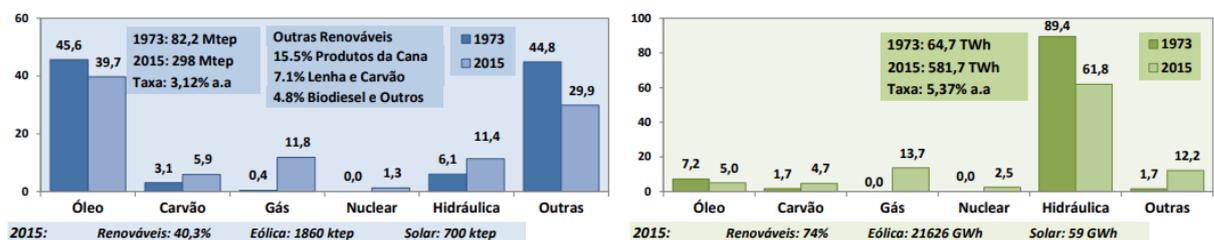
A seguir tem-se uma comparação das matrizes energética e elétrica do Brasil e do Mundo entre 1973 e 2015:

Figura 26 – Matriz Energética (%) em azul e Matriz Elétrica (%) em verde - Mundo 1973 - 2015



Fonte: Brasil - MME (2017).

Figura 27 – Matriz Energética (%) em azul e Matriz Elétrica (%) em verde - Brasil 1973 - 2015



Fonte: Brasil - MME (2017).

A demanda por energia continua a crescer globalmente, sendo os países em desenvolvimento os principais motores desse aumento. Contudo, a matriz energética mundial ainda é dominada por combustíveis fósseis. Um dos maiores concernimentos em relação a isso, levantado pela Organizações das Nações Unidas (UNITED NATIONS – UN, 2010), é como projetar uma matriz energética mais sustentável contando com fontes renováveis de energia.

Configura-se como um desafio nas escalas globais e nacionais de desenvolvimento o aumento do uso das fontes renováveis de maneira a garantir o suprimento de energia e de comida para todos.

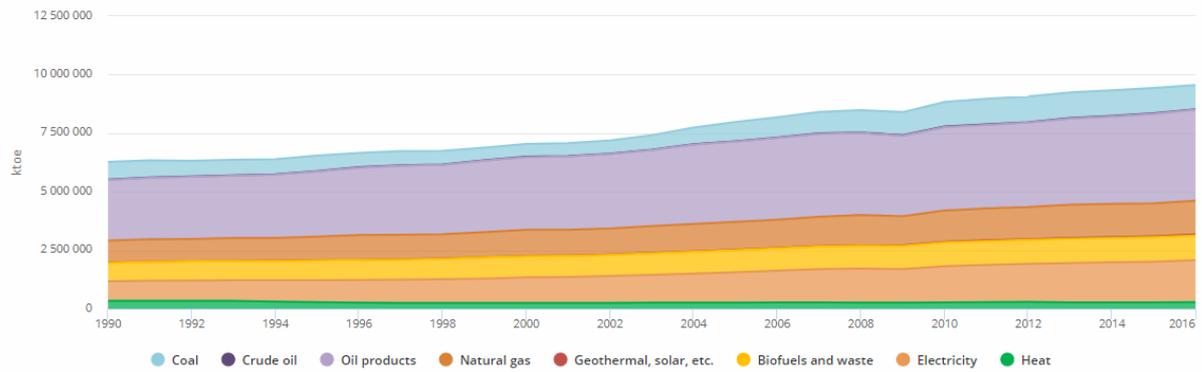
Por muitos anos, os combustíveis fósseis - incluindo carvão, petróleo e gás natural – foram as principais fontes de energia comerciais para produção industrial, aquecimento e transporte. Os hidrocarbonetos, e especialmente o petróleo e derivados, têm sido usados na indústria farmacêutica, na construção e no vestuário, bem como para produção de fertilizantes, alimentos, fabricação de plástico, pinturas, entre outras aplicações. A inclusão de outras fontes de energia, como a nuclear e as renováveis - eólica, solar, geotérmica, hídrica e biomassa - na matriz energética ainda tem sido marginal. Tais fontes têm potencial de crescimento, uma vez que há uma diminuição dos custos de implementação (que já foram relativamente bem mais altos), e por causa do aperfeiçoamento e desenvolvimento de novas tecnologias associadas à geração de energia por meio dessa fontes.

O reconhecimento do impacto ambiental nocivo do excesso de dependência de combustíveis fósseis, juntamente com preocupações crescentes sobre a oferta de alguns combustíveis fósseis para atender à crescente demanda global por energia, colocou em foco a necessidade de diversificação de fontes de energia. Nesse contexto, é que as energias renováveis, até mesmo os biocombustíveis, recebem crescente atenção. Além disso, choques no fornecimento de energia, começando com o óleo em 1973, alertaram os formuladores de políticas, tanto nos países desenvolvidos quanto nos em desenvolvimento a necessidade de se afastar da dependência de uma única fonte de energia. Crises como a que fez com que o preço do petróleo atingisse um pico em julho de 2008 próximo a US\$ 150 por barril (UN, 2010), serviram como um alerta para a necessidade de diversificação da matriz energética mundial.

Atualmente a participação das fontes renováveis na oferta de energia mundial não chega a 15%. Conforme a figura 27, a partir da década de 70, houve aumento na demanda energética global provocado pelo aumento da população e expansão da economia mundial que se orientou principalmente para as fontes primárias de combustíveis fósseis. No Brasil, Apesar dos percentuais similares com relação ao petróleo, a situação é bastante diferente do quadro mundial no que tange à oferta de energia. Por conta de nossos expressivos recursos hídricos e de biomassa, a participação das fontes renováveis de energia é bem maior – aproximadamente 43%.

Há um crescente aumento no consumo de energia em escala global, tal fato pode ser evidenciado pela figura 28 que mostra o consumo de energia por fonte, conforme a IEA (2018):

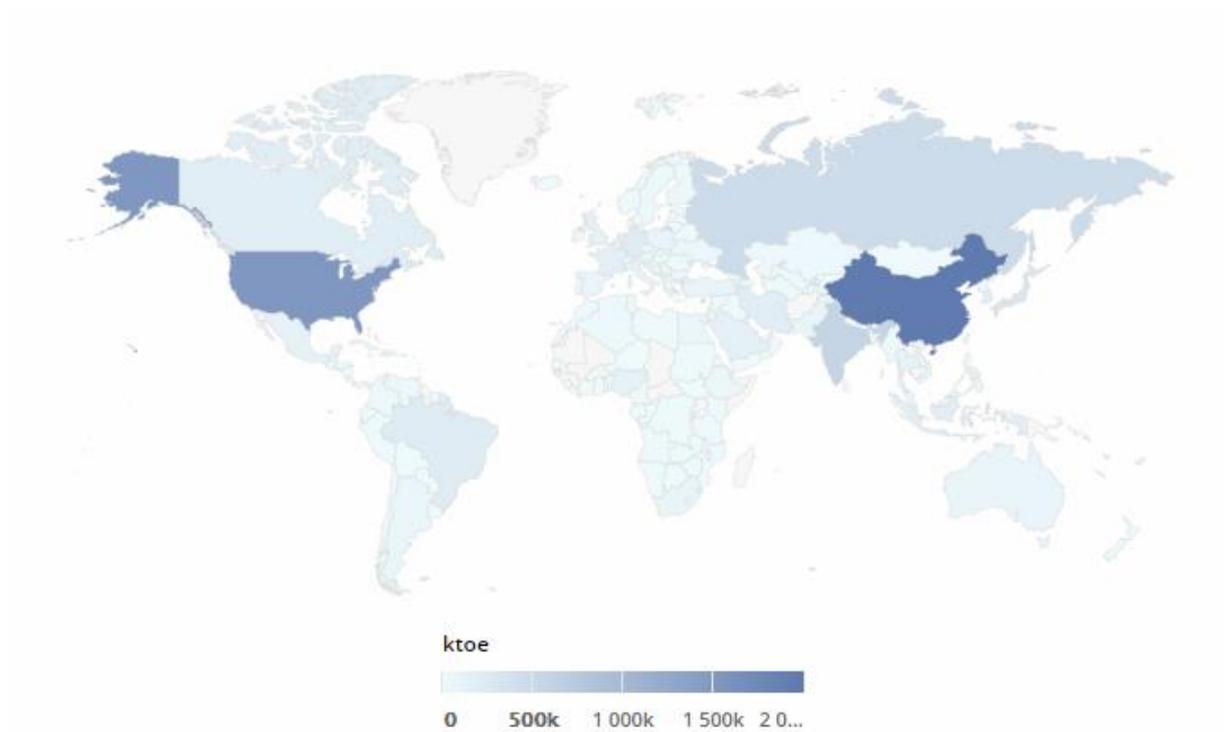
Figura 28 - Consumo Final Total por fonte (TFC) (ktep) por fonte – Mundo 1990 - 2016



Fonte: IEA (2018).

A IEA traz no Atlas de Energia, o mapa com o consumo final total de energia no ano de 2016:

Figura 29 – Consumo Final Total (TFC) (em ktep) – Mundo 2016



Fonte: IEA (2018).

A partir de uma rápida observação no mapa, já é possível notar que os maiores consumidores de energia do mundo são a República Popular da China seguida dos Estados Unidos da América.

A tabela 5 lista os maiores consumidores:

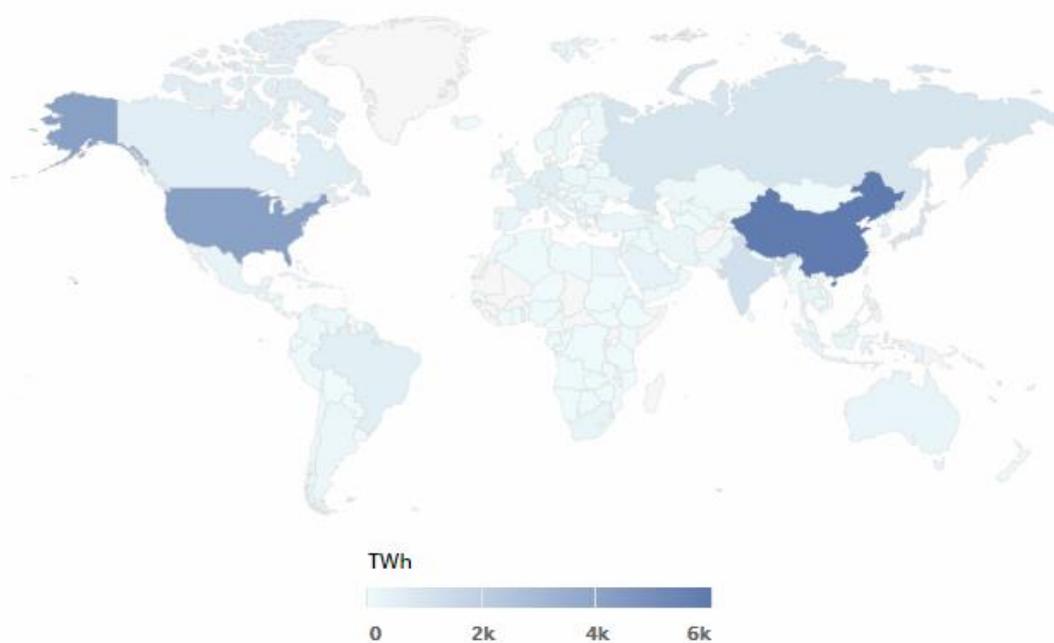
Tabela 5 – Lista de países por Consumo de Energia - 2016

<b>Classificação</b>	<b>País</b>	<b>Consumo Final Total - todas as fontes (em ktep)</b>
1	China	1.969.366
2	Estados Unidos	1.515.035
3	Índia	572.288
4	Rússia	469.770
5	Japão	294.047
6	Brasil	224.269
7	Alemanha	223.929
8	Canadá	191.404
9	Irã	188.480
10	Coréia do Sul	178.709

Fonte IEA (2018).

Apenas quatro primeiros países na lista somam de dois terços do suprimento global de energia. É notável que os dois primeiros tenham o consumo amplamente maior. Com relação ao consumo total de eletricidade no mundo temos o seguinte levantamento da IEA:

Figura 30 – Consumo de Energia Elétrica Total (em TWh) – Mundo 2016



Fonte: IEA (2018).

A correlação entre economia e energia é muito clara quando comparamos a tabela 5 (anterior) com as tabelas 6 e 7 que apresentam o PIB<sup>13</sup> em dólares das maiores economias do mundo de acordo com o Fundo Monetário Internacional – FMI.

Tabela 6 – Lista de países por PIB - 2016

<b>Classificação</b>	<b>País</b>	<b>Produto Interno Bruto (PIB) em bilhões de US\$</b>
1	Estados Unidos	18.569,10
2	China	11.218,28
3	Japão	4.938,64
4	Alemanha	3.466,64
5	Reino Unido	2.629,19
6	França	2.463,22
7	Índia	2.256,40
8	Itália	1.850,74
9	Brasil	1.798,62
10	Canadá	1.529,22

Fonte: FMI (2017).

Tabela 7 – Lista de países por PIB Paridade Poder de Compra (PPC) - 2016

<b>Classificação</b>	<b>País</b>	<b>PIB PPC em bilhões de US\$</b>
1	China	21.291,77
2	Estados Unidos	18.569,10
3	Índia	8.662,35
4	Japão	5.237,79
5	Alemanha	3.980,28
6	Rússia	3.799,70
7	Brasil	3.141,34
8	Indonésia	3.032,09
9	Reino Unido	2.785,56
10	França	2.733,68

Fonte: FMI (2017).

<sup>13</sup> PIB – Produto Interno Bruto; PIB nominal é o que foi efetivamente contabilizado na venda dos bens e serviços finais, normalmente a unidade monetária em que ele é expresso é o dólar americano (US\$). Já o PIB PPC, em que PPC quer dizer "Paridade do Poder de Compra" é uma medida inventada por economistas que levam em consideração o poder de compra do dólar em diferentes economias, assim se o dólar compra mais na Índia do que nos outros países o PIB nominal da Índia sofrerá uma modificação através de um fator de conversão que aumentará seu valor no cálculo do PIB PPC, assim como se o dólar possui um poder de compra menor no Japão do que nos outros países o PIB nominal japonês será reduzido no cálculo do PIB PPC. O objetivo do PIB PPC é procurar ser mais justo ao considerar o poder de compra nas mais diversas economias e não simplesmente o PIB nominal em dólar.

Fonte: Economia e Realidade (2018) – Prof. Antonio Amorim (UFPE). Disponível em: <<http://www.economiaerealidade.com/2010/08/pib-nominal-e-pib-ppc.html>>. Acesso em: 27 set. 2018.

Os Estados Unidos e a China são os países com os maiores valores de PIB e que apresentam os maiores valores de consumo de energia. Não se encontra de forma explícita nos fundamentos da teoria econômica a relação entre desenvolvimento econômico e consumo de energia. Contudo, conforme (FERREIRA NETO; CORREA; PEROBELLI, 2016) uma série de trabalhos empíricos têm sido realizados com o intuito de analisar tal relação. Diversos estudos têm como objeto a relação causal entre consumo de energia e crescimento econômico, seja por modelos bivariados, seja por meio de modelos multivariados. Embora não haja ainda consenso no que tange à existência e à direção da causalidade entre consumo de energia e crescimento econômico, é possível constatar um ponto comum na literatura: energia é essencial para o processo produtivo.

O Brasil ocupa a sexta posição dentre os países mais consumidores de energia. Dentre os chamados BRICS<sup>14</sup>, o consumo brasileiro só está a frente do consumo apresentado pela África do Sul. Contudo, o consumo nacional também vem crescendo ao longo dos anos conforme o Balanço Energético Nacional de 2017 (ano base 2016) apresentado a seguir nas figuras 32 e 33.

Alguns energéticos amplamente utilizados no início desse período analisado, entre 1970 e 2016, como a lenha e o óleo combustível, apresentaram reduções significativas nas suas participações no consumo final. Paralelamente, outros como a energia elétrica, o gás natural e os produtos da cana-de-açúcar cresceram muito. Os choques do petróleo, nos anos de 1973 e 1979, impactaram fortemente sobre a economia do Brasil. A elevada dependência de petróleo importado implicou na busca por estratégias de substituição dos derivados desse energético por fontes alternativas nacionais (EPE, 2007).

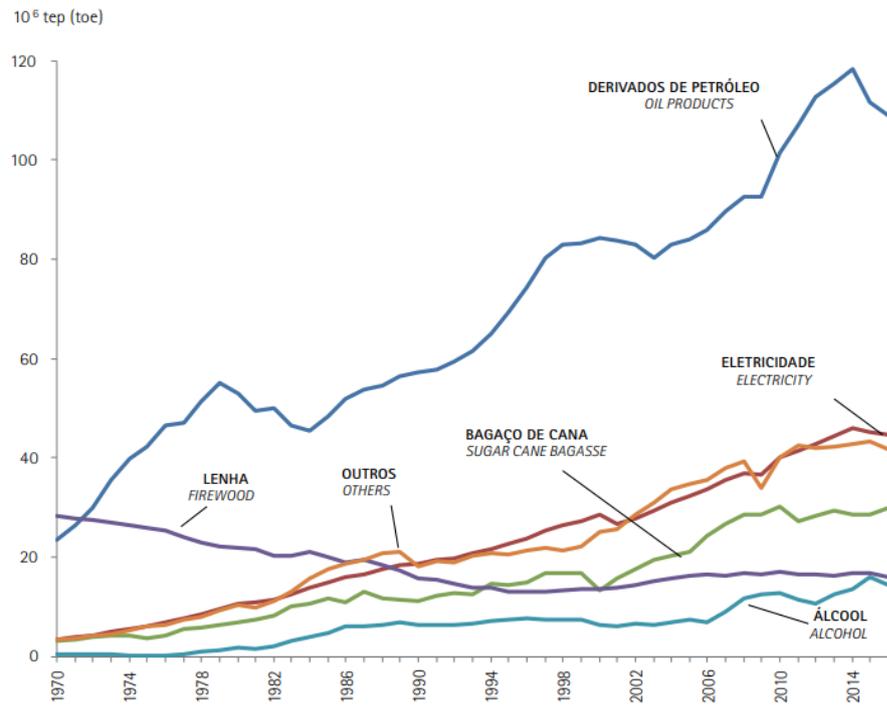
Os processos de industrialização e urbanização modificaram as participações dos setores e o próprio ritmo de crescimento do consumo. No setor residencial, ficou destacado o gradual deslocamento de energéticos que apresentam menores rendimentos de utilização por outros mais eficientes e mais adequados ao consumo urbano, como, por exemplo, a substituição de lenha por energia elétrica e por GLP. No setor industrial, as principais observações referem-se a maior participação deste no consumo final energético do país, fruto do desenvolvimento industrial observado no período, e a substituição de energéticos como a lenha e o óleo combustível por energia elétrica e por gás natural.

---

<sup>14</sup> BRICS – Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul. Grupo de países que estão em cooperação econômico-financeira.

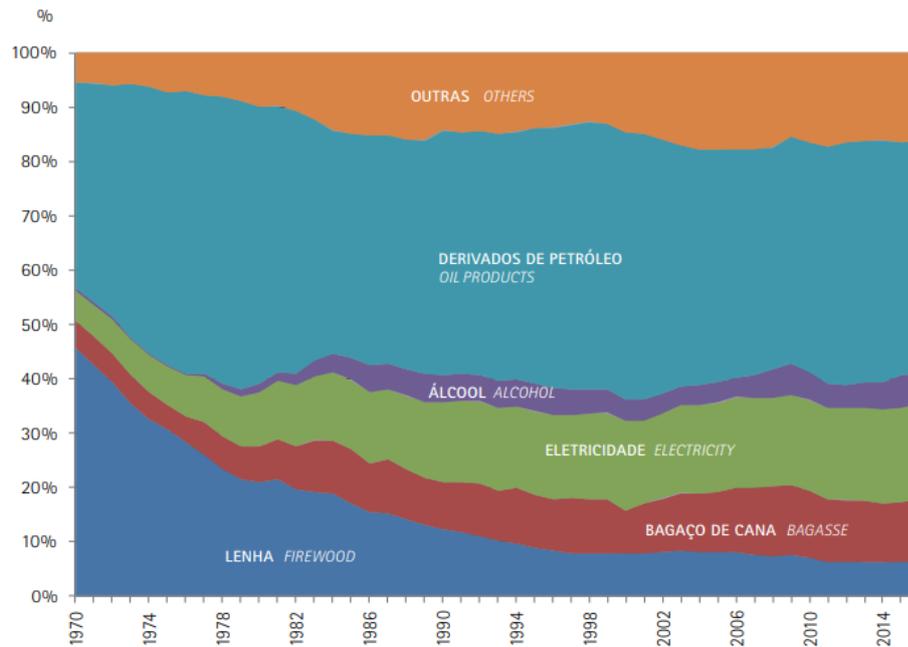
Fonte: Itamaraty (2018). Disponível em: <<http://www.itamaraty.gov.br/pt-BR/politica-externa/mecanismos-inter-regionais/3672-brics>>. Acesso em: 27 set. 2018.

Figura 31 – Consumo Final de Energia por Fonte (em tep) – Brasil 1970 - 2016



Fonte: EPE (2017).

Figura 32 – Consumo Final de Energia por Fonte (em %) – Brasil 1970 - 2016

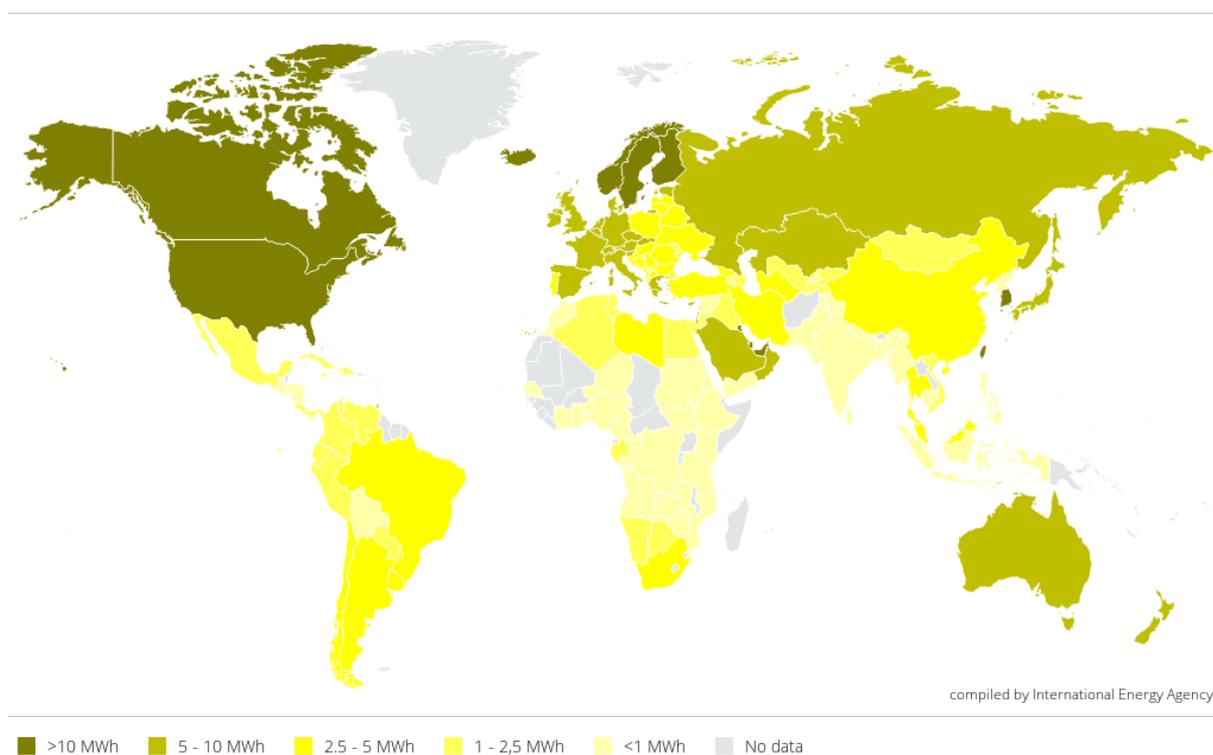


Fonte: EPE (2017).

No setor de transportes, por sua vez, o êxito do programa de substituição de gasolina automotiva por álcool no transporte rodoviário foi a principal questão identificada. O Proálcool, criado em 1975, apresentou uma fase declinante a partir da segunda metade da década de 80, mas mostra uma tendência de crescimento com o desenvolvimento dos veículos *flex-fuel*. No Brasil, energia e economia quase sempre estiveram no centro das políticas públicas, uma vez que a busca por um estilo de desenvolvimento que permitisse a estabilidade econômica e o pleno abastecimento interno de energia ainda é uma questão central no país (EPE, 2007).

No entanto, o consumo de energia elétrica no Brasil ainda é menor que em vários outros países. O consumo pode ser visto como uma função que depende do desenvolvimento econômico, uma vez que ele reflete a atividade dos setores produtivos e a capacidade da população de adquirir bens e serviços tecnologicamente mais avançados, como eletrodomésticos e equipamentos eletrônicos que requerem acesso à rede elétrica e com isso impulsionam o consumo da energia elétrica. Os mapas e a tabelas a seguir evidenciam o consumo de energia elétrica.

Figura 33 – Consumo de Energia Elétrica (MWh/ *capita*) - Mundo 2016



Fonte: IEA (2018).

Tabela 8 – Lista de países por Consumo de Eletricidade *per capita* - 2016

Classificação	País	Consumo de eletricidade <i>per capita</i> (MWh/capita)
1	Islândia	53,91
2	Noruega	23,69
3	Bahrein	19,51
4	Qatar	15,48
5	Finlândia	15,47
6	Kwait	15,28
7	Canadá	15,84
8	Luxemburgo	14,27
9	Suécia	13,76
10	Emirados Árabes Unidos	13,05
11	Estados Unidos	12,83

Fonte IEA (2018).

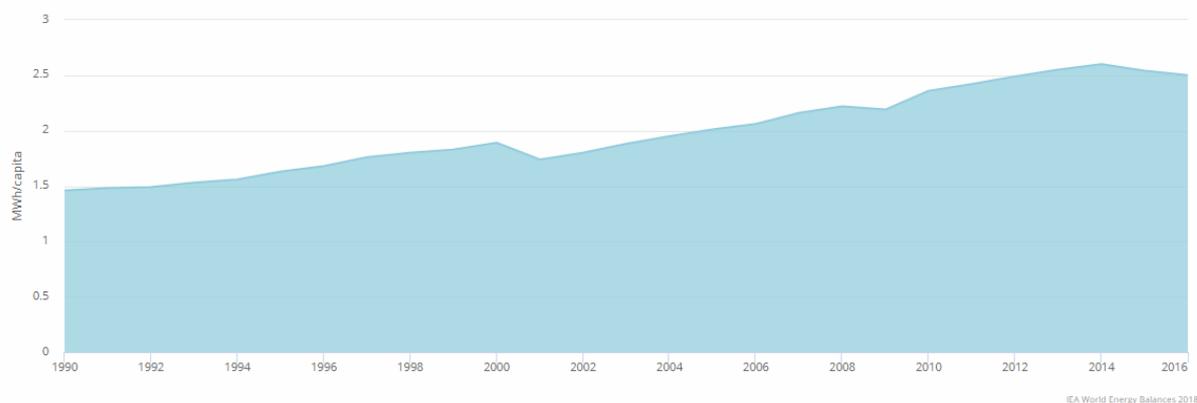
Há uma correlação entre o desenvolvimento econômico e o consumo da energia elétrica, ao considerarmos que grande parte do consumo de energia é feito pelas indústrias. Dessa forma, o consumo de eletricidade mede indiretamente o grau de industrialização de uma determinada região. Além do mais, consumo de eletricidade *per capita* está relacionado ao Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) – uma medida que leva em conta a expectativa de vida, escolaridade e PIB. Um maior consumo de energia elétrica *per capita* indica indiretamente quanto de recursos está à disposição de cada indivíduo. Conforme afirma o documento “Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho” da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (2007), um nível mínimo de eletricidade é exigido para apoiar o desenvolvimento humano e os países com IDH alto tendem a apresentar um maior consumo de eletricidade *per capita*. No entanto, pode haver países desenvolvidos com níveis não tão altos de consumo de energia, o que nos leva a acreditar que o desenvolvimento também pode se caracterizar pela busca da otimização da demanda de energia – sendo que muitos países desenvolvidos buscam a eficiência energética.

Há também muitos países em desenvolvimento que apresentam um alto consumo de energia elétrica por realizarem atividades industriais que consomem muita energia como a siderurgia e a produção de alumínio (ANEEL, 2008).

Comparativamente, no último levantamento apresentado pela IEA (ano base 2016), o Brasil apresenta um consumo de energia elétrica *per capita* menor do que outros países em desenvolvimento como a África do Sul; também menor do que outros países da América do Sul como o Chile e a Argentina.

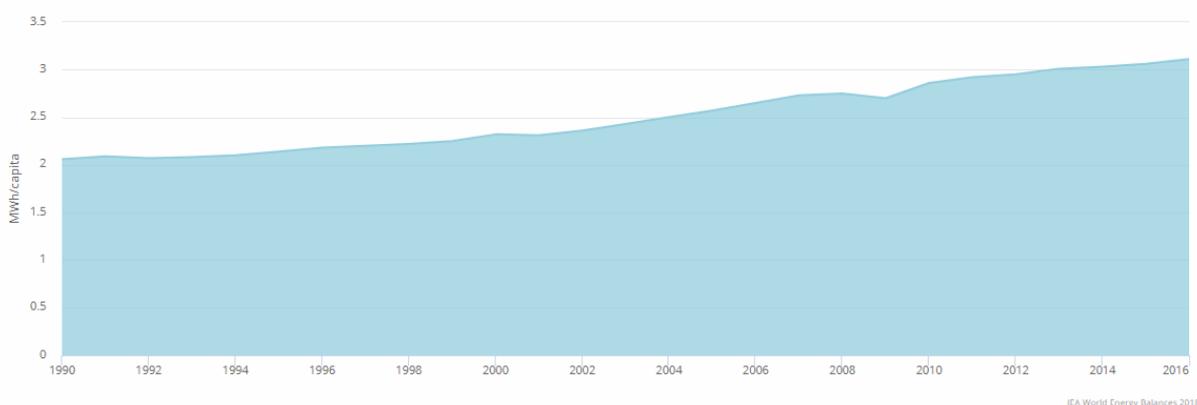
O consumo de energia elétrica no Brasil vem crescendo nos últimos anos, no entanto o consumo médio de energia elétrica *per capita* nacional é menor que o consumo médio mundial. Em 2016, no Brasil o consumo médio equivale a 2,5 MWh/*capita*, sendo o consumo médio mundial é 3,1 MWh/*capita*. As figuras a seguir trazem a evolução do consumo de eletricidade *per capita*:

Figura 34 – Consumo de eletricidade *per capita* - Brasil 1990 - 2016



Fonte: IEA (2018).

Figura 35 – Consumo de eletricidade *per capita* - Mundo 1990 - 2016

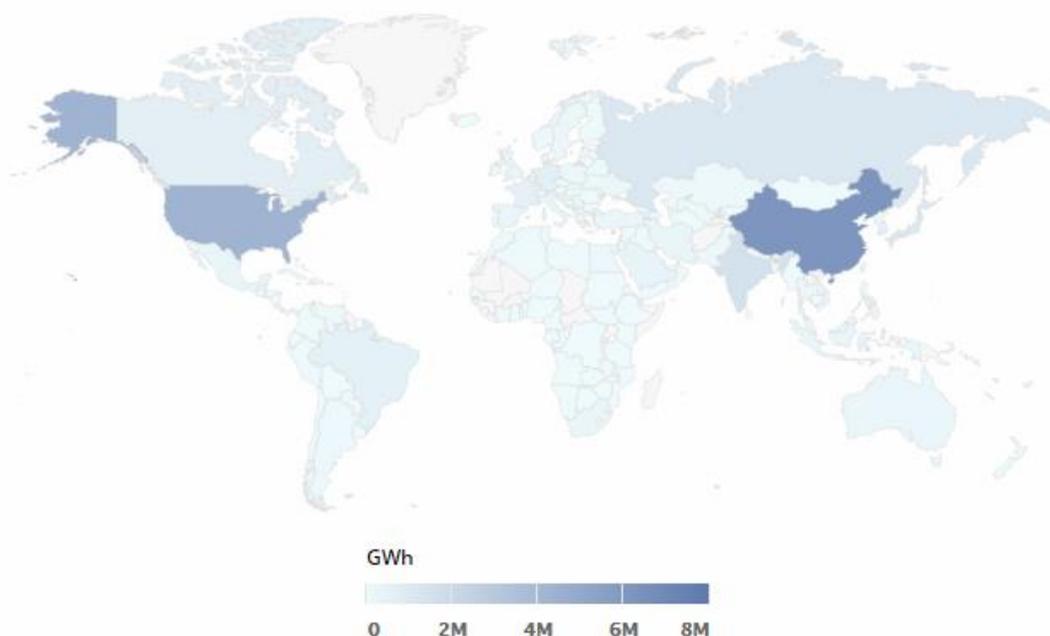


Fonte: IEA (2018).

Conforme a ANEEL, ciclos de expansão econômica têm impacto sobre o consumo local de energia. Um exemplo disso, no Brasil, ocorreu no ano de 1994 com a criação do Plano Real,



Figura 37 - Total de Geração de Eletricidade (GWh) (todas as fontes) - Mundo 2016



Fonte: IEA (2018).

## 6.1 Análise da energia por fonte

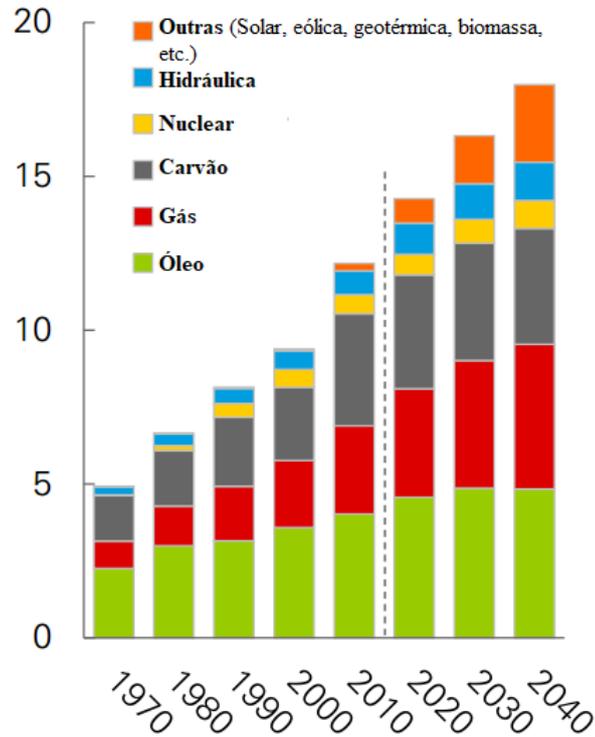
Historicamente, o sistema de energia global tem sido dominado por combustíveis que emitem altos níveis de gases que promovem o efeito de estufa<sup>15</sup>. Primeiramente, a lenha era o principal combustível industrial, mas seu uso só foi diminuindo depois da descoberta do carvão, que queima mais lentamente e tem um valor calorífico mais elevado. A partir do final do século XIX, o carvão tornou-se o principal combustível usado para Revolução Industrial. No entanto, o uso de óleo expandiu-se rapidamente após 1945, suplantando carvão na década de 1960, com o aumento da demanda por combustíveis para transporte (UN, 2010). Hoje, o sistema de energia global é muito mais complexo, com muitas fontes de energia concorrentes e muitos portadores de energia convenientes e de alta qualidade.

Em conjunto, os combustíveis fósseis – somando as fontes de carvão mineral, gás natural, petróleo e seus derivados – fornecem cerca de 80% de energia global, enquanto

<sup>15</sup> No anexo III se encontra uma explanação sobre o Efeito Estufa e o Aquecimento Global conforme o Ministério do Meio Ambiente.

biocombustíveis, lenha, energia hidrelétrica e energia nuclear fornecem o restante. A figura 38 traz o levantamento pela BP da demanda de energia por fonte primária no mundo:

Figura 38 – Demanda de energia primária (Gtep) por fonte - Mundo 1970 - 2040



Fonte: BP (2018).

No relatório de *2018 Energy Outlook*, a BP traz a projeção da demanda de energia até 2040 considerando um cenário de transição, levando em conta políticas governamentais, desenvolvimento tecnológico e preferências sociais. Nesse cenário, as emissões de carbono ainda são demasiadamente grandes e não estão conforme as metas estabelecidas no Acordo de Paris. Dessa forma, o relatório evidencia que são necessárias decisões mais duras de rompimento de com o passado em relação às formas de produção de energia; tornando-se necessário cada vez mais a utilização de fontes renováveis.

Na figura 18 é possível ver que a demanda total cresce significativamente até 2040; há uma ampliação em todos os tipos de fonte e, em termos percentuais de participação, as renováveis são as que têm o crescimento mais acelerado.

Conforme o Ministério do Meio Ambiente - MMA, um dos principais desafios para o século XXI é a mudança do clima; que terá implicações em transformações econômicas, políticas, sociais e na forma de pensamento da humanidade.

Com o objetivo de frear os prejuízos verificados pelo aumento descontrolado das emissões de gases de efeito estufa, foi criada a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (UNFCCC, na sigla em inglês). Todos os anos, representantes de mais de 193 nações se reúnem na Conferência das Partes (COP) para elaborar metas e propostas de mitigação e adaptação e para acompanhar as ações e acordos estabelecidos anteriormente.

No âmbito da UNFCCC, o Protocolo de Kyoto obriga os países desenvolvidos a reduzir em 5% as emissões com base nos dados de 1990. Apesar de estar fora do grupo, o Brasil assinou voluntariamente o protocolo e definiu metas próprias de redução em território nacional (BRASIL, 2018).

Criado em 1997, o Protocolo de Kyoto entrou em vigor no dia 16 de fevereiro de 2005, logo após o atendimento às condições que exigiam a ratificação por, no mínimo, 55% do total de países membros da Convenção e que fossem responsáveis por, pelo menos, 55% do total das emissões de 1990 (BRASIL, 2018).

Também esse contexto, no ano de 2015 em Paris na 21ª Conferência das Partes (COP21) da UNFCCC, foi então criado o já mencionado Acordo de Paris. Esse acordo tem o objetivo central de fortalecer a resposta à ameaça da mudança do clima e reforçar a capacidade dos países para lidarem com os impactos decorrentes dessas mudanças. No que diz respeito ao financiamento climático, o Acordo de Paris determina que os países desenvolvidos deverão investir 100 bilhões de dólares por ano em medidas de combate à mudança do clima e adaptação, em países em desenvolvimento. Foi aprovado pelos 195 países que fazem parte da UNFCCC para reduzir emissões de gases de efeito estufa (GEE) no contexto do desenvolvimento sustentável.

A busca de fontes renováveis e diversificação da matriz energética se constitui um desafio ainda maior ao avaliar o cenário proposto pela BP em que a demanda por energia cresce por volta de um terço até 2040.

A crescente demanda por energia é vista em todos os principais setores, sendo as indústrias responsáveis por mais da metade do aumento total. No entanto, o setor de transportes tem uma taxa de variação de demanda de energia atual menor que no passado, o que reflete um melhor desempenho da eficiência energética dos automóveis.

Ainda conforme as projeções da BP, quase 70% do aumento da demanda primária é usada para a geração de energia.

Nesse cenário de projeção ao longo do tempo ainda há uma significativa dependência dos combustíveis fósseis. Conforme afirma a ex-ministra do Meio Ambiente Izabella Teixeira, “esse não é um debate trivial nem exclusivamente ambiental. Estamos falando de mercados, economias e interesses distintos” (BRASIL, 2018). Dessa forma, a solução não é puramente dependente do desenvolvimento tecnológico ou da economia; de forma geral, implica na busca por uma sociedade cada vez mais sustentável. A necessidade de diversificação da matriz energética surge na análise realizada e que, ainda hoje, o sistema energético mundial é baseado em combustíveis fósseis que emitem poluentes e que são finitos.

O aumento crescente da demanda por energia tem sido alavancado por países em desenvolvimento como China, Rússia, Índia, e também o Brasil. Essa ascensão econômica tende a invariavelmente aumentar os níveis de emissão de poluentes na atmosfera.

O caso do Brasil é um caso interessante, no que se refere à matriz energética. Há cerca de 40 anos, o Brasil era ainda um país que tinha na lenha e no diesel grande parte de sua matriz energética. A energia proveniente da madeira tinha bem mais representatividade que atualmente, e o petróleo correspondia com cerca de 45% da matriz energética.

Desde os anos 1970, com a crise mundial do petróleo, o Brasil foi um dos pioneiros na exploração em massa de novas formas de energia, muitas delas, vale ressaltar, consideradas como energias limpas.

Hoje, sabemos que todas as nações do mundo estão em busca de novas formas de energia para se tornarem suas matrizes energéticas, dado o fato de que a dependência exclusiva de petróleo poderá significar custos maiores na cadeia de produção.

Em 2016, 42% da energia consumida no Brasil foi gerada em usinas hidrelétricas ou outras fontes renováveis (29% hidrelétrica e 13% eólica, solar e biocombustíveis). Essa é a maior participação em qualquer país ou região analisada pelo *Energy Outlook*. A BP ainda projeta um crescimento no consumo de energia no Brasil até 2040 de 60% (BP, 2018).

Mas, ao mesmo tempo, vale ressaltar que o Brasil tem um enorme potencial para aumentar a produção de energia e ao mesmo tempo transformar sua matriz energética para uma matriz mais limpa, isso graças a fatores como seus enormes recursos hídricos, graças a sua grande oferta de energia solar e eólica, graças a grande e crescente utilização de biomassa entre outros fatores.

As projeções de crescimento da economia atuais e a relação entre a oferta e a demanda de energia elétrica no Brasil ficam insustentáveis quando se observam os entraves que assolam os empreendimentos hidrelétricos em planejamento. A geração hidrelétrica é e vai continuar sendo, sem dúvida, a locomotiva que proporcionará o crescimento do país de modo competitivo

e ambientalmente diferenciado. Principalmente quando comparado a outros países emergentes, totalmente dependentes de combustíveis fósseis, caros, poluentes e não renováveis.

O consumo de energia tende a crescer conforme o Brasil se desenvolve. Já houve crise por falta de energia na nossa história recente. A crise do apagão no começo dos anos 2000 é um exemplo disso – entre 2000 e 2002, o Brasil enfrentou uma série de problemas no abastecimento de energia elétrica. Na época o governo elaborou um plano de racionamento para gerenciar a crise, com uma meta de economia de 20%, sendo que os consumidores que não atingissem esse valor veriam sua conta de luz mais cara<sup>16</sup>. Já no segundo semestre de 2006, a Região Sul quase apagou. O sistema Sudeste chegou a despachar energia para suprir a falta de água nos reservatórios sulinos e, se não fossem as novas linhas implantadas nos últimos anos, haveria um apagão.

No planejamento das hidrelétricas são levados em consideração os impactos ambientais. E um dos objetivos principais do planejamento é que esses impactos sejam os menores possíveis, sendo que os projetos que apresentam um potencial risco ao meio ambiente são rejeitados. Os empreendedores não investem em projetos que prejudicam a natureza, a avaliação ambiental é item prioritário quando se inicia um projeto e os projetos ambientalmente danosos são descartados. Não são abundantes grandes projetos como a Usina de Itaipu, com enormes reservatórios e grandes obras civis.

Atualmente, os projetos de usinas com potências menores vêm ganhando cada vez mais relevância. As PCHs são fontes renováveis, sendo classificadas como hidrelétricas de baixa potência, são certificadas no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) do protocolo de Kyoto, e geram créditos de carbono sendo certificadas ambientalmente por entidades ligadas à ONU. Nesse contexto, é que a implementação de PCHs no Brasil tem um papel importante no projeto de desenvolvimento sustentável.

---

<sup>16</sup> Informações contidas no artigo do jornal O Povo – **Blecautes - Os maiores apagões da história do Brasil**. Disponível em <<https://www.opovo.com.br/noticias/brasil/2018/03/confira-os-maiores-apagoes-da-historia-do-brasil.html>>. Acesso em 28 set. 2018.

## 7 VANTAGENS DAS PCHS

### 7.1 Situação Atual no Brasil – SIN e PROINFA

A capacidade de Geração do Brasil, conforme o Banco de Informação de Geração – BIG da ANEEL, em 29 de setembro de 2018, configura-se da seguinte maneira:

O Brasil possui no total 7.143 empreendimentos em operação, totalizando 160.672.617 kW de potência instalada.

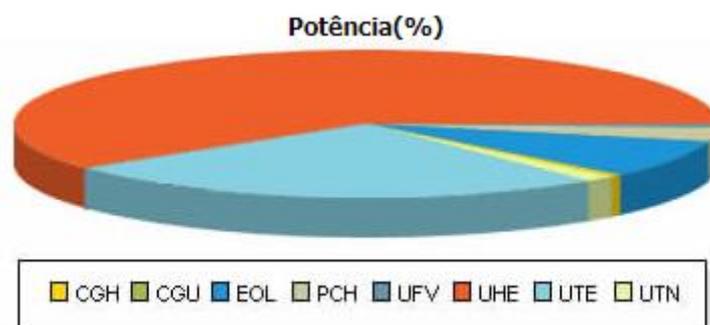
Está prevista para os próximos anos uma adição de 20.184.582 kW na capacidade de geração do País, proveniente dos 212 empreendimentos atualmente em construção e mais 392 em Empreendimentos com Construção não iniciada. As tabelas a seguir resumem a atual quadro nacional, com a Potência Outorgada e a Potência Fiscalizada (considerada a partir da operação comercial) a seguir:

Tabela 9 – Legenda

<b>Legenda</b>	
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CGU	Central Geradora Undi-elétrica
EOL	Central Geradora Eólica
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
UFV	Central Geradora Solar Foltovoltaica
UHE	Usina Hidrelétrica
UTE	Usina Termelétrica
UTN	Usina Termonuclear

Fonte: ANEEL (2018).

Figura 39 – Empreendimentos em Operação



Fonte: BIG ANEEL (2018).

Tabela 10 – Empreendimentos em Operação

<b>Empreendimentos em Operação</b>				
<b>Tipo</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Potência Outorgada (kW)</b>	<b>Potência Fiscalizada (kW)</b>	<b>%</b>
CGH	693	691.131	690.133	0,43
CGU	1	50	50	0
EOL	545	13.423.139	13.400.343	8,34
PCH	426	5.149.059	5.114.827	3,18
UFV	2.257	1.406.373	1.406.373	0,88
UHE	218	101.892.288	97.048.092	60,40
UTE	3.001	42.655.512	41.022.799	25,53
UTN	2	1.990.000	1.990.000	1,24
<b>Total</b>	<b>7.143</b>	<b>167.207.552</b>	<b>160.672.617</b>	<b>100</b>

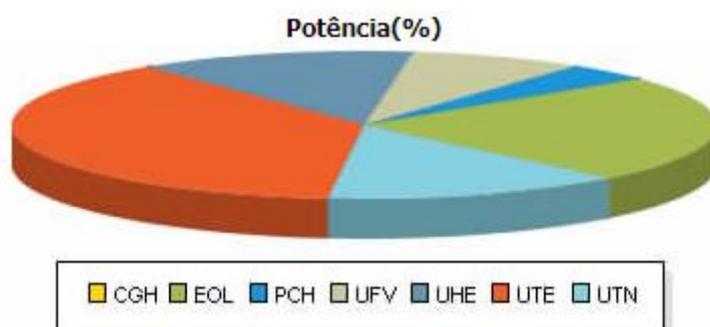
Fonte: BIG ANEEL (2018).

Tabela 11 – Empreendimentos em Construção

<b>Empreendimentos em Construção</b>			
<b>Tipo</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Potência Outorgada (kW)</b>	<b>%</b>
CGH	5	4.810	0,05
EOL	109	2.350.050	23,74
PCH	31	397.209	4,01
UFV	29	803.296	8,11
UHE	6	1.254.100	12,67
UTE	31	3.741.034	37,79
UTN	1	1.350.000	13,64
<b>Total</b>	<b>212</b>	<b>9.900.499</b>	<b>100</b>

Fonte: BIG ANEEL (2018).

Figura 40 – Empreendimentos em Construção



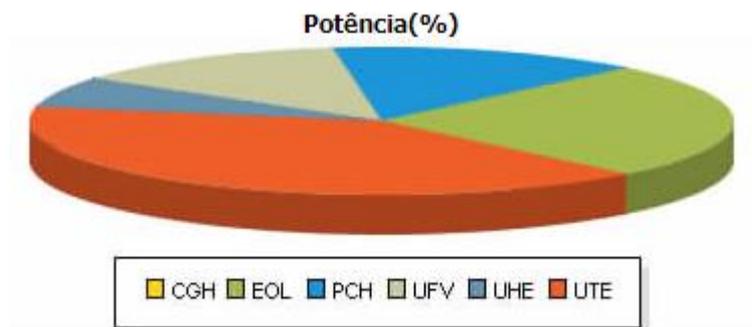
Fonte: BIG ANEEL (2018).

Tabela 12 – Empreendimentos com Construção não iniciada

<b>Empreendimentos em Construção</b>			
<b>Tipo</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Potência Outorgada (kW)</b>	<b>%</b>
CGH	3	8.100	0,08
EOL	108	2.639.735	25,67
PCH	113	1.487.839	14,47
UFV	48	1.329.075	12,92
UHE	7	694.180	6,75
UTE	113	4.125.154	40,11
<b>Total</b>	<b>392</b>	<b>10.284.083</b>	<b>100</b>

Fonte: BIG ANEEL (2018).

Figura 41 – Empreendimentos com Construção não iniciada



Fonte: BIG ANEEL (2018).

O Brasil se destaca por já possuir uma matriz energética com ampla participação de renováveis atualmente, esse cenário não é verificado em muitos outros países do mundo. Isso significa que as emissões de gases do efeito estufa por unidade de energia gerada são relativamente menores que outros países. Analisando a matriz econômica em um cenário econômico otimista, o Plano Decenal de Expansão de Energia 2026 (EPE, 2017) projeta um crescimento médio de 3,2% a. a. o que implicaria em impactos sobre a demanda, aumento do consumo de energia *per capita* em aproximadamente 6%, e dessa forma, exigindo uma maior oferta de energia.

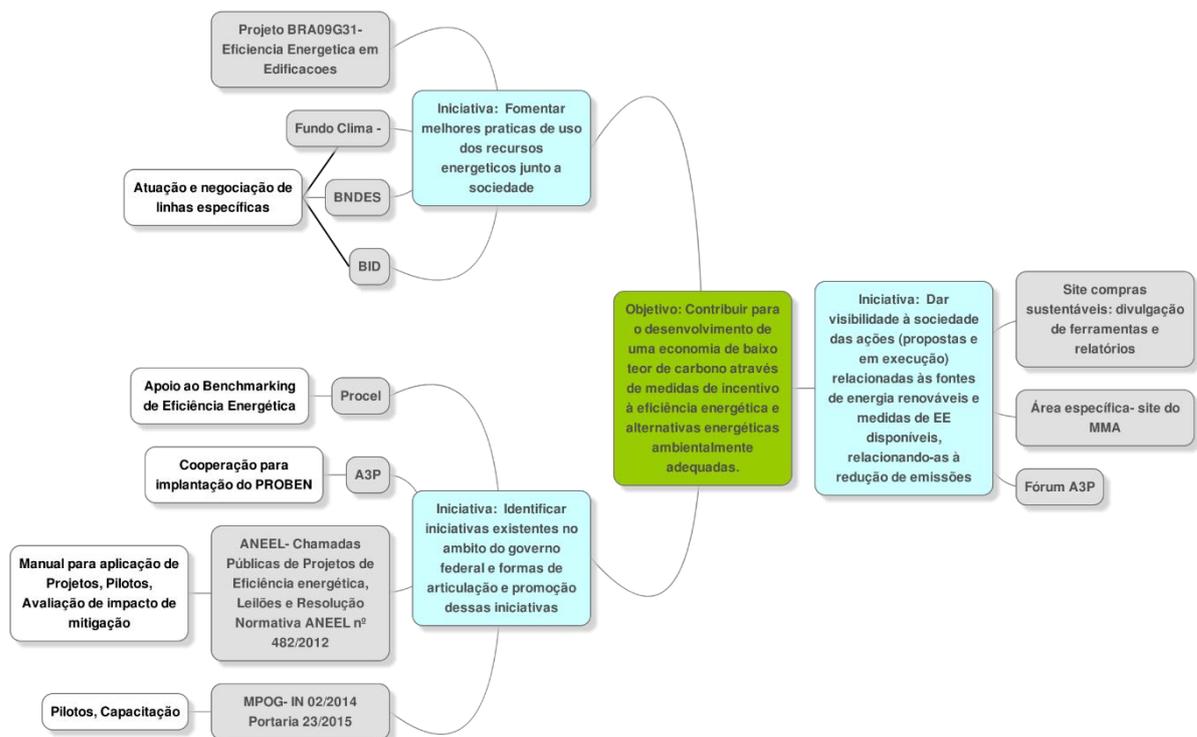
A necessidade de ampliação do fornecimento de energia tem dado espaço para um debate acerca da desse fornecimento, impulsionado pelos efeitos de ordem ambiental e social da redução da dependência de combustíveis fósseis. Conforme já relatado há o interesse mundial por soluções sustentáveis por meio da geração de energia oriunda de fontes limpas e renováveis. O Brasil é um destaque em função da sua liderança nas principais frentes de negociação e da significativa participação das fontes renováveis na sua matriz energética.

No cenário atual, que configura a transição para uma nova economia mundial, o Brasil apresenta vantagens competitivas necessárias para fazer mudanças relativamente rápidas na direção de uma economia de baixo teor de carbono, acelerando o desenvolvimento humano e o investimento em inovação e, conseqüentemente, aumentando a eficiência e a competitividade de sua economia (BRASIL, 2018).

Existem hoje diretrizes da Política Nacional sobre Mudança do Clima (Lei 12.187/2009) – de “estímulo e o apoio à manutenção e à promoção de práticas, atividades e tecnologias de baixas emissões de gases de efeito estufa - GEE”. A partir dessas diretrizes, o Departamento de Mudanças Climáticas ligado ao MMA definiu dois objetivos estratégicos:

- Ampliar e aprimorar o papel do Ministério do Meio Ambiente nas discussões das políticas nacionais de energia e eficiência energética visando a integração de estratégias para redução de emissão de gases de efeito estufa.
- Contribuir para o desenvolvimento de uma economia de baixo teor de carbono através de medidas de incentivo à eficiência energética e alternativas energéticas ambientalmente adequadas (BRASIL, 2018).

Figura 42 – Segundo Objetivo do Departamento de Mudanças Climáticas



Fonte: Brasil - MMA (2018).

Com relação ao segundo objetivo de incentivo à eficiência energética e a energia renováveis, foram definidas iniciativas prioritárias. Para atender a cada uma dessas iniciativas o Departamento de Mudanças Climáticas tem atuado e implementado diversas ações como indicado no diagrama.

Nesse contexto, foi criado o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas – PROINFA através da Lei nº 10.438/2002 que têm por objetivo promover a expansão da oferta da energia elétrica. Essa lei também trata recomposição tarifária extraordinária, cria a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica e dá outras providências.

Essa iniciativa tem um caráter estrutural, que visa uma alavancagem nos ganhos de escala, aprendizagem tecnológica, a competitividade industrial nos mercados interno e externo e, sobretudo, a identificação e a apropriação dos benefícios técnicos, ambientais e socioeconômicos na definição da competitividade econômico-energética de projetos de geração que utilizem fontes limpas e sustentáveis.

As fontes de energia contempladas pelo PROINFA são a energia eólica – aproveitamento da energia cinética dos ventos; biomassa – através da combustão de matéria orgânica de origem animal ou vegetal como o bagaço de cana, resíduos de madeira ou biogás; e as Pequenas Centrais Hidrelétricas.

O Programa é administrado pelo Ministério de Minas e Energia – MEE. Esse órgão do governo é que fica então responsável por estabelecer o planejamento anual de ações a serem implementadas, definindo o montante anual de contratação e avaliando o impacto decorrente dos custos aos consumidores finais. A implantação da contratação e seleção dos empreendimentos para compra e venda de energia são realizados pela Eletrobrás.

Embora atualmente não estejam em ritmo tão acelerado, de forma geral, os programas de fomento às fontes renováveis e a reestruturação do setor de energia elétrica têm flexibilizado a viabilidade de implementação de projetos de PCHs. Principalmente desde 1996, diversas mudanças no Setor Elétrico nacional foram feitas com o objetivo de regulamentar as atividades, definir os processos e responsabilidades, visando tornar o setor mais transparente e com mais credibilidade. Foram estabelecidas novas normas quanto à frente de atuação e a continuidade da estrutura regulatória em geral.

No modelo atual do setor elétrico brasileiro, a comercialização de energia elétrica passou a contar com dois ambientes de negociação a partir de 2004: o Ambiente de Contratação Regulada - ACR, com agentes de geração e de distribuição de energia; e o Ambiente de Contratação Livre - ACL, com geradores, distribuidores, comercializadores, importadores e

exportadores, além dos consumidores livres e especiais. Existe também o mercado de curto prazo, também conhecido como mercado de diferença, no qual se promove o ajuste entre os volumes contratados e os volumes medidos de energia. Esta configuração integra o modelo setorial vigente, implantado em 2004 e fruto de um aprimoramento originado em 1998, com o chamado Projeto de Reestruturação do Setor Elétrico – Projeto RE-SEB (CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – CCEE, 2018).

Desse projeto de reestruturação entre 1996 e 1998, as principais conjecturas elaboradas foram a necessidade de desverticalização das empresas de energia elétrica; fomentar a competição na geração e comercialização e, manter sob regulação do Estado os setores de transmissão e distribuição. A tabela 13 traz de forma sucinta as mudanças ocorridas no setor elétrico brasileiro, comparando os modelos adotados no Brasil.

No modelo atual, os leilões foram instituídos com o principal objetivo de alcançar a modicidade tarifária. Esses leilões são realizados por delegação da ANEEL, pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE e, funcionam como instrumento de compra de energia elétrica pelas distribuidoras no ambiente regulado. O critério utilizado é o de menor tarifa que visa a redução do custo de aquisição da energia elétrica a ser repassada aos consumidores cativos (CCEE, 2018).

O modelo em vigor exige a contratação de totalidade da demanda por parte das distribuidoras e dos consumidores livres; nova metodologia de cálculo do lastro para venda de geração; contratação de usinas hidrelétricas e termelétricas em proporções que assegurem melhor equilíbrio entre garantia e custo de suprimento, bem como o monitoramento permanente da segurança de suprimento. Este modelo foi implantado por meio das Leis nº 10.847 e 10.848, de 15 de março de 2004, e pelo Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004.

Em termos institucionais, o atual modelo definiu a criação da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE em 2004, como organização sucessora do Mercado Atacadista de Energia - MAE. Foram criados ainda o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico – CMSE, com o objetivo de avaliar permanentemente a segurança do suprimento de energia elétrica no país; e a Empresa de Pesquisa Energética – EPE, responsável pelo planejamento do setor elétrico a longo prazo. O exercício do Poder Concedente foi outorgado ao Ministério de Minas e Energia - MME.

A estrutura setorial completa-se com a Agência Nacional de Energia Elétrica - Aneel, que atua como órgão regulador do setor, e com o Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, responsável pela operação das instalações de geração e transmissão nos sistemas interligados brasileiros (CCEE, 2018).

Tabela 13 – Mudanças no setor elétrico brasileiro

<b>Mudanças no setor elétrico brasileiro</b>		
<b>Modelo Antigo (até 1995)</b>	<b>Modelo de Livre Mercado (1995 a 2003)</b>	<b>Novo Modelo (2004)</b>
Financiamento através de recursos públicos	Financiamento através de recursos públicos e privados	Financiamento através de recursos públicos e privados
Empresas verticalizadas	Empresas divididas por atividade: geração, transmissão, distribuição e comercialização	Empresas divididas por atividade: geração, transmissão, distribuição, comercialização, importação e exportação.
Empresas predominantemente Estatais	Abertura e ênfase na privatização das Empresas	Convivência entre Empresas Estatais e Privadas
Monopólios - Competição inexistente	Competição na geração e comercialização	Competição na geração e comercialização
Consumidores Cativos	Consumidores Livres e Cativos	Consumidores Livres e Cativos
Tarifas reguladas em todos os segmentos	Preços livremente negociados na geração e comercialização	No ambiente livre: Preços livremente negociados na geração e comercialização. No ambiente regulado: leilão e licitação pela menor tarifa
Mercado Regulado	Mercado Livre	Convivência entre Mercados Livre e Regulado
Planejamento Determinativo - Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos (GCPS)	Planejamento Indicativo pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE).	Planejamento pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE)
Contratação: 100% do Mercado	Contratação: 85% do mercado (até agosto/2003) e 95% mercado (até dez./2004)	Contratação: 100% do mercado mais reserva
Sobras/déficits do balanço energético rateados entre compradores	Sobras/déficits do balanço energético liquidados no MAE	Sobras/déficits do balanço energético liquidados na CCEE. Mecanismo de Compensação de Sobras e Déficits (MCSO) para as Distribuidoras.

Fonte: CCEE (2018).

Nesse contexto, visando estimular a participação do capital privado na expansão da matriz energética, foram atribuídos às PCHs incentivos regulatórios. Dentre os incentivos de

natureza financeira se destacam os descontos nas Tarifas de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD), com valores de 50% ou 100%, conforme estipulado pela ANEEL.

Existem também incentivos de caráter regulatório como simplificações no processo de registro e aprovação dos inventários dos potenciais, na obtenção das licenças ambientais; além da possibilidade de participarem do portfólio de geração conhecido como Mecanismo de Realocação de Energia (MRE)<sup>17</sup>.

As cotas do PROINFA estão alocadas nas distribuidoras quando o consumidor ainda está sob o gerenciamento de energia através do Mercado Regulado.

Assim que o consumidor potencialmente livre migra para o Mercado Livre de Energia, as cotas passam a compor o saldo de contratos de compra do agente no Mercado Livre de Energia e tem como agente vendedor a ACEP (agente comercializador de energia do PROINFA).

A quantidade de energia que é proveniente do PROINFA é determinada de forma anual e alocada para cada agente através de sazonalidade definida pela Eletrobrás.

Portanto, as cotas de energia provenientes do PROINFA são como um contrato de compra de energia livre, e computarão como requisitos de compra para verificar o consumo, lastro e todas as outras medidas de gerenciamento dos agentes consumidores na Câmara de Comercialização de Energia - CCEE.

Os custos do PROINFA são então, divididos entre todos os consumidores finais atendidos pelo Sistema Elétrico Interligado Nacional segundo o consumo verificado.

## 7.2 Análise dos impactos ambientais

No caso da implementação de uma hidrelétrica, as alterações biofísicas na área do projeto e na área de influência do empreendimento começam efetivamente, com desvios ou derivações dos rios. Isso é necessário para as principais construções. No entanto, os efeitos mais críticos acontecem no período de enchimento do reservatório. Nessa fase ocorre a submersão de sistemas bióticos, abióticos e sociais dessa determinada área a ser inundada (EPE, 2017).

---

<sup>17</sup> O Mecanismo de Realocação de Energia (MRE) é um mecanismo financeiro que visa o compartilhamento dos riscos hidrológicos que afetam os agentes de geração, buscando garantir a otimização dos recursos hidrelétricos do Sistema Interligado Nacional (SIN). O MRE realoca contabilmente a energia, transferindo o excedente daqueles que geraram além de sua garantia física para aqueles que geraram abaixo. A necessidade de instituição do MRE se verifica principalmente devido às grandes extensões territoriais do país, em que existem diferenças hidrológicas significativas entre as regiões, com períodos secos e úmidos não coincidentes.  
Fonte: CCEE (2018).

Dessa forma, o principal impacto ambiental ocasionado pela instalação de usinas hidrelétricas são os alagamentos que ocorrem com a construção de reservatórios para a acumulação de água e regularização de vazões. Advindo das inundações, ocorrem alterações no regime das águas e formação de microclimas, prejudicando a diversidade biológica ali presente, podendo inclusive extinguir certas espécies de sua fauna e flora.

Com os alagamentos, há degradação anaeróbica da matéria orgânica, assim também emitindo gases de efeito estufa à atmosfera. Para o caso de grandes hidrelétricas, no entanto, há a necessidade de um estudo prévio para a relocação de pessoas e animais silvestres da região receptora devido às grandes inundações que atingem propriedades rurais localizadas próximas às margens dos reservatórios, áreas cujos solos têm normalmente elevada fertilidade natural.

As PCHs no entanto, não utilizam grandes reservatórios para armazenagem de grandes volumes de águas. Muitas delas operam a fio d'água, permitindo a passagem contínua de água; aproveitando a força da correnteza sem precisar estocar a água. De forma geral, as PCHs requerem uma pequena área inundável o que representa geração de energia limpa frente à um custo ambiental pequeno.

No entanto, apesar do baixo impacto frente às grandes hidrelétricas, o processo de licenciamento ambiental é similar ao exigido pelas grandes usinas - estudos, emissões de licenciamentos, programas de controle e mitigação ambiental.

Conforme o Prof. Geraldo Lúcio Filho, no ano de 2009 em entrevista ao Instituto Humanitas da Unisinos – IHU, afirma:

“No Programa PROINFA, estão sendo construídas em torno de 63 empreendimentos de PCH, que resultam em 1200 MW e uma área alagada de 200 quilômetros quadrados. Enquanto que a UHE Sobradinho, com uma potência de 1050 MW, tem uma área alagada de 4381 quilômetros quadrados. Temos que levar em conta que Sobradinho possui a função de regularizar a vazão do rio São Francisco e as PCHs funcionam sem regularização.” (IHU, 2009).

A implantação de PCHs implica na formação de um número maior de áreas protegidas, conhecidas como Áreas de Preservação Permanente (APPs), ampliando as populações de espécies de fauna e flora nativas nas áreas de influência destas APPs.

Pode-se detectar impactos das usinas hidrelétricas tais como: inundação de áreas agricultáveis; perda de vegetação e da fauna terrestres; possível interferência na migração dos

peixes; mudanças hidrológicas a jusante da represa; alterações na fauna do rio; interferências no transporte de sedimentos.

No entanto, as PCHs possuem vantagens frente às grandes hidrelétricas, uma vez que normalmente não têm interferência com a transposição dos peixes, pois geralmente os locais onde são instaladas têm desníveis consideráveis como cachoeiras e, portanto constituem uma barreira natural à piracema.

Além do benefício da produção de energia hidreletricidade; as PCHs apresentam benefícios socioambientais tais como: a retenção de água regionalmente; aumento do potencial de água potável e de recursos hídricos reservados; a criação de possibilidades de recreação e turismo; aumento do potencial de irrigação; possível aumento da produção de peixes e da possibilidade de aquicultura; além da regulação do fluxo e inundações; e de maneira indireta um aumento das possibilidades de trabalho para a população local (NILTON, 2009).

### 7.3 Principais Benefícios das PCHs

A construção de PCHs, conforme foi analisado, representa uma importante alternativa de produção de energia renovável, pois não produz tantos impactos quanto os causados pela construção de grandes reservatórios, inclusive não interferindo significativamente no regime hidrológico do curso d'água. Além do mais, as Pequenas Centrais podem servir como complementação de grandes sistemas em função de um risco menor de investimento.

Dentre as vantagens, as PCHs têm um custo médio mais acessível que as grandes hidrelétricas, contando com um menor prazo de implementação de projetos e de maturação do investimento.

Há ainda vantagens técnicas de implementação de PCHs; existe uma probabilidade maior de se encontrarem potenciais aproveitamentos de geração com PCHs mais próximos dos centros consumidores – o que acarreta em economia na transmissão da energia. Além de que é possível a realização de projetos com resultados excelentes com simplificações, assim se dá mais vantagens das PCHs frente às grandes centrais hidrelétricas que exigem estudos muito mais complexos para se garantir uma maior precisão dos resultados a longo prazo. Dessa forma, os projetos de PCHs também são executados em um período significativamente mais curto que das grandes centrais.

As PCHs podem ocupar principalmente um papel importante na complementação da geração da matriz energética, atuantes nos sistemas de Geração Distribuída (GD). Geração Distribuída (GD), conforme o Instituto Nacional de Eficiência Energética – INEE (2018), é

uma expressão usada para designar a geração elétrica realizada junto ou próxima dos consumidores independente da potência, tecnologia e fonte de energia. Sendo que, atualmente, as tecnologias de GD têm evoluído para incluir potências cada vez menores.

Com a geração distribuída há uma articulação da operação com geradores, equipamentos de medidas entre outras interligações com um eventual controle (regulação) de cargas para adaptação dessas à oferta de energia, visando uma otimização dos sistemas. Assim, as PCHs podem ocupar um importante papel na matriz energética, inclusive pelo fato de serem espalhadas por todo território nacional, o que permite uma diminuição dos custos com a instalação de linhas de transmissão.

Conforme o Plano Decenal de Expansão de Energia 2026 da EPE (2017), a introdução de medidores inteligentes e da tarifação dinâmica possui o potencial para a criação de redes inteligentes – ou *smart grids* – que irão contribuir para a expansão do setor elétrico. *Smart grid* é um sistema elétrico interligado com automação e telecomunicações que permite a otimização e integração de novas tecnologias, a Geração Distribuída, a resposta da demanda, uma melhor regulação do armazenamento e em um futuro próximo, o abastecimento de veículos elétricos.

A difusão do sistema *smart grid* apresenta uma solução possível para o desafio de suprimento energético, uma vez que nesse sistema o consumidor passe de simples usuário para assumir maior protagonismo no setor, com participação mais ativa no mercado de energia e tornando-se “prosumidor” (como é conhecido o consumidor que se torna produtor de energia), com a possibilidade de produzir energia e até disponibilizá-la a outros consumidores de sua região.

Em escala nacional, os empreendimentos de PCHs apresentam ainda uma vantagem pelo fato de existirem empresas e profissionais totalmente competentes e experientes. O Brasil apresenta profissionais com um excelente *know-how* nessa área.

Com a implementação de PCHs no Brasil ainda teríamos uma garantia maior do abastecimento regional, promovendo uma descentralização da geração o que melhora a eficiência do sistema nacional.

A tecnologia utilizada na implementação de PCHs é totalmente dominada e disponível no Brasil. Assim sendo, a construção de PCHs contribuem para a valorização e fortalecimento da indústria nacional de equipamentos e da construção civil, bem como a geração de empregos e tributos dentro do território nacional.

Ao demandar a participação de profissionais de diversas áreas, como engenheiros agrônomos e florestais - na elaboração de estudos do meio físico e da vegetação; biólogos com especialidade em botânica; engenheiros eletricitistas e mecânicos na área de equipamentos; além

de pedreiros e engenheiros civis na realização das obras civis. Estima-se que são gerados em média 41 empregos por cada megawatt instalado, todos no Brasil, enquanto outras fontes deslocam indiretamente empregos de brasileiros e os transferem para a Ásia, Europa e EUA. Será que isso é correto, num momento em que temos quase 14 milhões de desempregados? (VALBUSA, 2018).

As PCHs também apresentam vantagem frente à geração eólica, dado que existem postos de medição distribuídos por todas bacias hidrográficas brasileiras, com um acervo de dados de mais de um século, garantindo um alto nível de conhecimento em relação ao risco hidrológico. Dessa forma, a margem de erro para a determinação da energia firme de uma PCH é mínima e tal capacidade de previsão não existe para as fontes eólicas.

O custo de manutenção de uma PCH é relativamente baixo. A vida útil de uma PCH pode ser de mais de 60 anos. A maioria das PCHs existentes no Brasil são equipadas com turbinas Francis de eixo horizontal, que requerem um número muito menor de intervenções para manutenção por causa da configuração das partes móveis desse tipo de turbina (VALBUSA, 2018).

As PCHs são também uma das melhores opções existentes para fornecer energia elétrica para as zonas rurais. O desenvolvimento de pequenas centrais hidrelétricas nas áreas rurais envolve condições socioambientais, partindo da gestão local da propriedade e participação da comunidade.

Sob o aspecto global, de uma forma geral, países economicamente desenvolvidos apresentam uma taxa de aproveitamento de seu potencial hidráulico bastante superior à dos países em desenvolvimento (EPE, 2007). Na China, nem só grandes projetos como Três Gargantas (18.200 MW) e Ertan (3.300 MW) vêm sendo implementados, como também centrais com menos de 50 MW vêm desempenhando um papel importante no desenvolvimento da economia de algumas áreas rurais chinesas mais remotas.

De acordo com a Agência Internacional para Energias Renováveis (*International Renewable Energy Agency*) – IRENA (2012), a China tem sido particularmente bem sucedida na instalação dessas centrais em projetos para atender metas de eletrificação rural; sendo que em 2010, 160 TWh foram produzidos a partir dos 45 mil projetos de centrais hidrelétricas com menos 50 MW.

No Brasil, ainda há uma grande burocracia para aprovação de projetos de incremento da expansão hidrelétrica. Um dos países com maior abundância de recursos hídricos deve fazer proveito disso para se desenvolver. Uma flexibilização no setor abriria mais espaço para

implementação de PCHs com vantagens cada vez mais proveitosas, com retornos financeiros melhores ao longo do tempo.

A construção de PCHs, como evidenciado, pode fomentar a economia com investimentos públicos e privados, acarretando geração de empregos; gerando energia de forma limpa, sustentável e com impactos ambientais mínimos.



## 8 ANÁLISE DAS VARIÁVEIS NA IMPLANTAÇÃO DE PCHS

### 8.1 Crescimento do Consumo

Conforme já evidenciado, estima-se um crescimento de consumo de eletricidade tanto no aspecto global quanto em escala nacional (BP, 2018). Essa estimativa de crescimento do consumo poderá sofrer alterações motivadas principalmente pelas seguintes causas:

- Variação da renda per capita;
- Variação do contingente populacional;
- Surgimento de novos produtos ou serviços consumidores de energia elétrica;
- Ampliação da participação dos setores industriais; surgimento de novos setores industriais ou de serviços eletrointensivos;

Essas considerações implicam em uma maior demanda por energia elétrica, sendo que é então necessário:

- Ampliar a capacidade de geração;
- Investimentos em tecnologias que geram energia de forma mais eficiente;
- Diminuição do preço da energia elétrica.

Sob essas considerações que se deve ponderar uma análise de viabilidade econômica da inserção de PCHs na matriz elétrica.

### 8.2 Custos da Energia

Conforme mencionado, a partir de 2000 o preço da energia elétrica no Brasil passou a ser definido através de leilões (CCEE). Portanto, podemos analisar as séries históricas para tirar algumas conclusões.

Nos últimos 15 anos, a expansão da geração se deu via contratação de energia em grandes ondas de fontes específicas.

Ocorreu primeiramente, uma onda de contratação de Usinas Termelétricas Fósseis (UTES). Entre 2005 e 2016 foram contratados 23.689MW de UTES Engenho Oprincipalmente à diesel, à óleo combustível, à gás (GN e GNL). Muitas destas UTES não chegaram a ser construídas, nem seus acionistas pagaram a totalidade das multas e penalidades previstas em contrato (ARBEX, 2017).

Apesar dessas fontes serem caras e altamente poluentes, foram contratadas com a justificativa que desempenhariam o papel dos reservatórios das hidrelétricas (armazenamento de energia), seriam a energia segura do setor elétrico brasileiro e apresentariam um custo/benefício melhor que as hidrelétricas. Nas análises para tais justificativas foi desprezada a consideração sobre o preço em R\$/MWh e utilizado um Índice de Custo Benefício (ICB). Pelo critério de ICB, conforme um diagnóstico do Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) feito pela ABRAPCH (2017), algumas UTEs que hoje estão custando ao país mais de R\$1000/MWh se sagraram vencedoras em leilões, mesmo com UHEs que ofereciam energia abaixo de R\$180/MWh.

Uma segunda onda de contratação ocorreu com as chamadas hidrelétricas estruturantes (Santo Antônio, Jirau e Belo Monte em 2007, 2008 e 2010, respectivamente) (ARBEX, 2017). Essas três hidrelétricas somaram aproximadamente 17.900 MW de potência instalada e foram licitadas a tarifas baixas (valor atualizado para junho de 2017 entre R\$123/MWh e R\$142/MWh). As tarifas dessas hidrelétricas são baixas, mas não agregam o custo total da energia com os custos da transmissão e os subsídios como os financiamentos de 30 anos pelo BNDES.

Uma terceira onda de contratação ocorreu com as eólicas. Entre 2009 e 2016, foram contratados mais de 15000 MW de eólicas. As justificativas foram de que os custos em geral seriam baixos e os impactos ambientais mínimos. No entanto, não foram levados em consideração os custos com a construção de milhares de quilômetros do litoral do Nordeste e interior da Bahia que foram rateados entre todos os consumidores e geradores do país. Além dos custos para cobrir a intermitência – mantendo usinas térmicas com combustíveis fósseis e hidrelétricas a disposição para estabilizar o sistema.

Com relação à energia hidrelétrica, de 2005 a 2016 foram contratados apenas 1.704 MW de CGHs e PCHs (142MW/ano), com tarifas entre R\$145/MWh e R\$220/MWh sem tantos subsídios e favorecimentos que outras fontes tiveram. A fonte solar, que ingressou nos leilões regulados do Brasil apenas em 2014, já teve contratação de 1.724 MW em 2014 e 2015 com os custos de cobertura da intermitência solar transferidos para o sistema (ABRAPCH, 2017).

A fonte hidrelétrica é a forma mais eficiente de se gerar energia elétrica, com índices de conversão que podem chegar a 86,5%. Motores a combustão, por exemplo, tem eficiência entre 35% e 45%.

De acordo com Arbex (2017), a Engenho Consultoria realizou um estudo conforme apresentado na tabela 14, acerca dos custos diretos das principais fontes de energia considerando o período de 2005 a abril de 2017. Foi feito um levantamento sobre o quanto de

investimento (líquido de ajustes) cada fonte recebeu por ano e, em seguida, esse valor em reais foi então dividido pela energia fornecida entregue (em MWh).

Dessa forma, foi apurado o custo real por MWh efetivamente entregue de cada fonte, líquido de qualquer intercorrência, como geração abaixo do valor comercializado, não incluindo tributos e encargos nem incentivos como o PROINFA.

Tabela 14 – Custo da Energia Entregue (R\$/MWh)

Ano	Fontes Renováveis				Fontes Não-Renováveis				
	UHE	PCH + CGH	Outra (Resíduos)	Eólica	Bio-massa	Carvão	Gás + GNL	Óleo	Diesel
2005	94					224	516	1106	
2006	122					248	699	683	
2007	126					224	993	683	
2008	130					224	430	773	
2009	135					224	534	2 250	
2010	129	248	289		332	243	220	881	
2011	126	251	162		331	420	263	960	
2012	130	239	176	556	315	357	219	785	
2013	152	222	614	501	452	262	313	606	858
2014	149	180	294	360	790	216	409	474	827
2015	190	186	230	286	464	215	399	508	1 032
2016	181	234	251	197	444	221	374	654	5 953
2017	191	243	302	362	397	220	432	1 052	6 017
<b>Média</b>	<b>143</b>	<b>225</b>	<b>290</b>	<b>377</b>	<b>441</b>	<b>254</b>	<b>446</b>	<b>878</b>	<b>2 937</b>

Fonte: Engenho Consultoria (2017).

O estudo não contempla efeitos de subsídios diretos, nem indiretos de nenhuma fonte como a desoneração fiscal das eólicas ou a parcela do desconto de renováveis que está prescrita sem a contrapartida de a usina arcar com os custos da infraestrutura de transmissão.

O custo médio das CGHs e PCHs foi de R\$225/MWh. Notavelmente, mesmo outras fontes renováveis ficaram bem acima desse patamar.

O preço médio de custo da energia entregue pelas eólicas gira em torno R\$377/MWh (67,5% mais caras), da energia proveniente da biomassa ficou em R\$441/MWh (96% mais cara), e os resíduos urbanos, com R\$290/MWh (28,9% mais caras).

Se fossem levados em consideração os custos dos subsídios, as vantagens das CGHs e PCHs para o consumidor ficariam muito mais evidentes com o valor dos custos muito próximos ou ainda menor que o valor dos custos da geração por UHEs.

### 8.3 Preço de venda da Energia

Considerando a atual configuração da capacidade de geração nacional, as PCHs ainda não têm muita participação na oferta de energia para o mercado. Do ponto de vista de viabilidade de colocação no mercado da energia elétrica produzida por uma PCH, o preço praticado em relação aos demais concorrentes é de vital importância.

A energia elétrica vendida no Brasil é padronizada, não permitindo diferenciação no produto final – eletricidade. Os esforços para implementação de novas PCHs devem intervir para que a PCH tenha o menor preço de colocação da energia produzida. Consequentemente, os projetos devem ter o menor custo global de energia elétrica, considerando todos os fatores. A estratégia de inserção de PCHs no mercado visa então a liderança de custo, buscando a excelência operacional. Deve ser priorizada uma política de segmentação que propicie a redução dos custos de manutenção, de vendas e de administração.

Economicamente, o principal fator que contribui para a formação do custo da energia elétrica produzida por uma PCH é o valor do investimento total em relação à energia efetiva a ser produzida (energia assegurada), ou seja, quanto menor esta relação maior viabilidade para a estratégia de liderança de custos.

Por outro lado, para obter preços de venda de energia competitivos, a PCH deve associar a outros parceiros, atingindo, assim retornos mais expressivos do capital investido.

Conforme a Associação Brasileira de Pequenas Centrais Hidrelétricas e Centrais Geradoras – ABRAPCH, a perspectiva é que o investimento em uma PCH ou CGH pode ir até um valor de R\$10 milhões por MW instalado. Nesse patamar existe uma possibilidade de viabilidade econômica. O presidente da associação, Paulo Arbex, afirma que “Um preço excepcional seria algo entre R\$ 5 e R\$ 6 milhões para cada MW instalado para termos viabilidade”. Ele acredita que o custo do investimento em PCHs poderia recuar entre 10% a 20% se houvesse uma redução da tributação dessa fonte, tomando de exemplo as desonerações que são concedidas para a fonte eólica (ABRAPCH, 2018).

### 8.4 Possíveis Oportunidades e Ameaças

Na análise de investimentos em PCHs devem ser considerados fatores favoráveis e contrários. A tabela 15 foi elaborada resumindo alguns fatores a serem considerados como possíveis oportunidades ou riscos (ameaças) à inserção de PCHs na matriz elétrica.

Tabela 15 – Oportunidades e Ameaças

<b>Oportunidades</b>	<b>Ameaças</b>
Incentivos fiscais	Futuras alterações na legislação poderão prejudicar o empreendimento
Condições melhores para financiamento do investimento inicial	Preço não tão competitivo
Crescimento do consumo	Clientes sensíveis a segurança do fornecimento
Tempo de implantação relativamente rápido	Reservatório menor / menos confiabilidade
Empresas disponíveis para alianças estratégicas	Possível risco hidrológico (falta de chuvas)
Menor agressão ao meio ambiente	Muita burocracia para licenciamento ambiental

Fonte: Elaboração própria (2018) com base em nota técnica do BRDE.

### 8.5 Como é feito o estudo de viabilidade econômica

A viabilidade econômica de uma PCH depende fundamentalmente do preço de venda da energia e dos investimentos realizados por MWh gerado. Outras variáveis também afetam a rentabilidade, como o tempo de instalação da usina, o nível de utilização da capacidade instalada, os custos administrativos e os encargos financeiros dos financiamentos contratados.

O instrumento analítico, que agrega todas as variáveis envolvidas, é o cálculo do retorno econômico do projeto sintetizado pela Taxa Interna de Retorno (TIR), que determina a remuneração básica dos capitais investidos.

#### 8.5.1 Taxa Interna de Retorno (TIR)

Taxa Interna de Retorno (TIR) é definida como a taxa de juros (ou de desconto) que torna nulo o valor presente do Fluxo de Caixa do projeto (BANCO REGIONAL DE DESENVOLVIMENTO DO EXTREMO SUL – BRDE, 2002). O fluxo de caixa de caixa do projeto, sobre o qual se calcula a Taxa Interna de Retorno (TIR) é dado pela soma do resultado contábil do projeto com a depreciações e as liberações do financiamento a ser concedido, abatidos os investimentos e amortizações do financiamento, conforme a tabela 17 - Fluxo de Caixa do Investimento.

O Resultado contábil do projeto é calculado pela diferença entre as receitas dos valores de venda da energia elétrica e os custos (incluídas as depreciações), descontados os impostos,

taxas de demais contribuições. A Taxa Interna de Retorno (TIR) é calculada sobre o fluxo de caixa do projeto, formado pelos seus saldos anuais de caixa. Essa TIR é nomeada “Taxa Interna de Retorno com Financiamento” e é usada para mensurar a rentabilidade dos capitais próprios investidos. A rentabilidade do projeto como um todo é determinada pela “Taxa Interna de Retorno sem financiamento”. O cálculo dessa TIR se dá ao eliminar os itens “4.1 – Juros do financiamento” da tabela 16, que apresenta o demonstrativo do resultado contábil do projeto, e, os itens “Liberações” e “Amortizações” da tabela 17, que apresenta o fluxo de caixa do investimento.

Tabela 16 – Demonstrativo do Resultado Contábil

<b>Especificações \ Anos</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>...</b>	<b>n</b>	<b>Observações</b>
<b>1. Receita Bruta</b>						Receita anual de venda da energia elétrica
<b>2. Tributos</b>						Impostos Indiretos que incidem sobre faturamento
2.1 ICMS						Incide somente se a venda for direta
2.2 COFINS						Alíquota sobre o faturamento
2.3 PIS						Alíquota sobre o faturamento
<b>3. Receita Líquida</b>						Receita bruta – Tributos
<b>4. Custos</b>						Custos Adm./Op. + Depreciações + Juros do financiamento
4.1 Custos Adm/Oper.						Custos operacionais / capacidade instalada
4.2 Depreciações						Depreciação dos investimentos ao longo dos anos
4.3 Juros Financiamento						Total de juros pagos ao ano
<b>5. Lucro Líquido antes IR</b>						
<b>6. Impostos sobre Lucro</b>						Impostos diretos sobre os lucros
6.1 Imposto de Renda						Alíquota sobre o LL
6.2 Adicional de IR						Alíquota sobre o LL
6.3 Contribuições sociais sobre LL						Alíquota sobre o LL
<b>7. Lucro Líquido após IR</b>						<b>Lucro Líquido do Projeto</b>

Fonte: Elaboração própria (2018) com base em nota técnica do BRDE.

Tabela 17 – Fluxo de Caixa do Investimento

<b>Especificações \ Anos</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>...</b>	<b>n</b>	<b>Observações</b>
<b>Entradas de Caixa</b>						LL após IR + depreciações + liberações do financiamento
LL após IR						Item “7” da tabela anterior
Depreciações						Item “4.2” da tabela anterior
Liberações do Financiamento						Quadro de usos e fontes do projeto
<b>Saídas de Caixa</b>						Investimento + Amortizações do financiamento
Investimentos						Quadro de usos e fontes do projeto
Amortizações do Financiamento						Esquema de amortização do financiamento
<b>Saldo Anual do Caixa</b>						<b>Fluxo de Caixa para o cálculo da TIR do empreendedor</b>

Fonte: Elaboração própria (2018) com base em nota técnica do BRDE.

Os valores adequados para a Taxa Interna de Retorno devem ser aproximadamente iguais ao retorno esperado para outros investimentos no país da mesma classe de riscos. Deve ser elaborada uma análise comparativa de investimentos considerando os prazos de concessão das PCHs de aproximadamente 30 anos (BRDE, 2002).

Dessa forma, torna-se bastante comum no setor a fixação de limites que indicam a provável viabilidade do projeto de PCH, como por exemplo a determinação de uma faixa preço de venda (em R\$/MWh) ou investimentos até um determinado valor por capacidade instalada (em R\$/ MW de potência).

Tais referência são importantes para uma análise expedita, mas não servem para a tomada de decisão sobre a adequação do projeto. Ainda mais se considerarmos uma certa instabilidade do ambiente macroeconômico do país.

Uma análise de viabilidade econômica mais elaborada deve levar em consideração também, os custos relacionados à ligação da PCH às linhas de transmissão. Nessas análises são considerados os custos de uma possível necessidade de implantação da rede de transmissão além de despesas de instalação de uma subestação interligada à rede.

São totalmente aceitáveis projetos sem análise de viabilidade puramente econômica, uma vez que não estão voltados para o mercado como acontece com os autoprodutores. Um exemplo de participação nessa forma de empreendimento são empresas que possuem um mercado cativo e, por razões estratégicas decidem produzir sua própria energia. Os projetos PCH se apresentam viáveis na visão de muitas empresas por gerarem créditos de carbono.



## 9 CONCLUSÃO

Ao longo dos séculos as civilizações aproveitaram o poder da água para se desenvolverem. Desde os equipamentos primordiais como os usados pelas civilizações antigas para a moagem de grãos e produção de farinha, ao longo da história, a tecnologia das rodas d'água do passado foi desenvolvida, o que levou ao surgimento das turbinas altamente eficientes que geram eletricidade. Esse trabalho analisou em profundidade o atual renascimento da Pequena Central Hidrelétrica como alternativa para ampliar a capacidade de geração e promover o desenvolvimento sustentável.

Em geral, a principal vantagem da energia hidrelétrica é que ela fornece uma fonte de eletricidade estável e segura, e pode contrapor frente à intermitência de outras tecnologias de energia renovável, como energia solar fotovoltaica e eólica. Pelos sistemas serem alimentados por água, relativamente não geram exorbitantes quantidades de poluição nem de outros resíduos líquidos ou sólidos.

A energia hidráulica se configura como uma forma renovável de gerar energia. Além do mais, dentre as fontes renováveis, a geração hidrelétrica apresenta vantagens frente às outras, uma vez que há um maior grau de previsibilidade do ciclo hidrológico o que impacta diretamente em um menor risco de investimento em empreendimentos hidrelétricos e um maior grau de segurança de geração de eletricidade.

Nesse contexto, as Pequenas Centrais Hidrelétricas se configuram como uma solução para o desafio energético atual. Apresentam vantagens até mesmo frente às grandes centrais por causarem um menor impacto ambiental, um menor custo total e um tempo reduzido de implantação. E conforme estabelecido no protocolo de Kyoto, ainda geram créditos de carbono.

De acordo a legislação brasileira, as PCHs devem possuir áreas de preservação permanente (APPs) que têm como função a recuperação da flora e fauna nativa, o que garante uma benfeitoria ambiental.

Além do mais, as PCHs não exigem tantos esforços e recursos para serem instaladas quanto as grandes centrais. Apresentam tecnologias adaptáveis, garantindo flexibilização e otimização de projetos – sendo então possíveis de serem instaladas em diversos tipos de lugares. Apresentam também a flexibilidade de poderem ser interligadas à rede trabalhando com Geração Distribuída (GD) e com o Mecanismo de Realocação de Energia (MRE).

O consumo de energia no Brasil só vem crescendo ao longo dos últimos anos e, é evidente a necessidade de ampliar a capacidade de geração. As principais dificuldades de se

implementar PCHs na matriz nacional são devidas à burocracia para conseguir os licenciamentos necessários e ainda a um valor de investimento inicial relativamente alto, por causa da alta carga tributária presente em nosso país. É preciso flexibilizar ainda mais implementação de projetos de geração de energia renováveis.

Embora atualmente os programas de incentivos às fontes renováveis não estejam em um ritmo muito acelerado, eles têm ajudado, em conjunto com as mudanças estruturais no setor elétrico, a viabilizar projetos de PCH. Uma forma de atrair mais investimentos é com incentivos regulatórios para ampliar a participação de investidores privados no setor de energia. No geral, investimentos nessas usinas são viáveis porque as pequenas centrais são um caminho para a construção de um mundo mais sustentável por gerarem energia de forma limpa e barata.

O Brasil tem um dos maiores potenciais hidrelétricos do mundo e a viabilização de projetos de PCHs tem como características a possibilidade de fomentar o empreendedorismo e a geração de empregos. Dessa forma, podemos servir de exemplo de desenvolvimento sustentável para o mundo a partir de uma matriz energética cada vez mais limpa e renovável.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS E CENTRAIS GERADORAS HIDRELÉTRICAS. Disponível em: <<http://www.abrapch.org.br/>>. Acesso em 29 set. 2018

\_\_\_\_\_. **Contribuição à Consulta Pública MME nº 33 de 2015**. Contribuição em favor dos interesses da ABRAPCH quanto as alterações pertinentes às Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCHs e Centrais Hidrelétricas - CGHs. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www.abrapch.org.br/admin/arquivos/arquivos/12/abrapch-cp-33-710.pdf>>. Acesso em: 02 out. 2018.

AES TIETÊ. **Museu Virtual de Patrimônio Cultural**. Disponível em: <<http://museuvirtualaestiete.weebly.com/pch-mogi-guacedilu.html>>. Acesso em: 29 set. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **DRDH**. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/outorgaefiscalizacao/drdh.aspx>>. Acesso em: 30 set. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2. ed. Brasília, 2005. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro\\_atlas.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf)>. Acesso em: 25 set. 2018.

\_\_\_\_\_. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília, 2008. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf>>. Acesso em: 25 set. 2018.

\_\_\_\_\_. **Banco de Informações de Geração**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em 29 set. 2018.

\_\_\_\_\_. **Resolução nº394**, de 04 de dezembro de 1998. Estabelece os critérios para o enquadramento de empreendimentos hidrelétricos na condição de pequenas centrais hidrelétricas. Brasília, 1998. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/res1998394.pdf>>. Acesso em: 29 set. 2018.

\_\_\_\_\_. **Resolução nº652**, de 09 de dezembro de 2003. Estabelece os critérios para o enquadramento de empreendimentos hidrelétricos na condição de Pequena Central Hidrelétrica (PCH). Brasília, 2003. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/res2003652.pdf>>. Acesso em 12 out. 2018.

\_\_\_\_\_. **Resolução nº673**, de 04 de agosto de 2015. Estabelece os requisitos e procedimentos para a obtenção de outorga de autorização para exploração de aproveitamento de potencial hidráulico com características de Pequena Central Hidrelétrica - PCH. Brasília, 2015. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015673.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2018.

ALSTOM NO BRASIL. Disponível em: <<https://www.alstom.com/pt/alstom-no-brasil>>. Acesso em: 06 out. 2018.

ARBEX, P. A Necessária reestruturação do setor elétrico: a energia que precisamos e merecemos. **Canal Energia**. Artigos, 25 jul. 2017. Disponível em: <<https://www.canalenergia.com.br/artigos/53027396/a-necessaria-reestruturacao-do-setor-eletrico-brasileiro-a-energia-que-precisamos-e-merecemos>> Acesso em: 03 out. 2018.

BANCO REGIONAL DE DESENVOLVIMENTO DO EXTREMO SUL. **Informe sobre as PCH's**. Porto Alegre, BRDE, 2002.

BP. **2018 BP Energy Outlook**. Disponível em: <[bp.com/energyoutlook](http://bp.com/energyoutlook)>. Acesso em: 28 set. 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Energia**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/energia.html>>. Acesso em: 28 set. 2018.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Energia no Mundo 2015 - 2016**. Matrizes Energéticas. Matrizes Elétricas. Indicadores. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/14+-+Energia+no+Mundo+-+Matrizes+e+Indicadores+2017+-+anos+ref.+2015+-+16+%28PDF%29/60755215-705a-4e76-94ee-b27def639806;jsessionid=23A29A5505323A1DD0ED0E7D02E956E2.srv155>>. Acesso em: 25 set. 2018.

BRASIL. Lei nº10.438, de 26 de abril de 2002. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE) e dá outras providências. **Presidência da República**. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. Brasília, 26 abr. 2002. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/2002/L10438.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/2002/L10438.htm)>. Acesso em: 14 set. 2018.

\_\_\_\_\_. Lei nº12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC e dá outras providências. **Presidência da República**. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. Brasília, 29 dez. 2009. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2009/Lei/L12187.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2009/Lei/L12187.htm)>. Acesso em: 14 set. 2018.

\_\_\_\_\_. Lei nº13.097, de 19 de janeiro de 2015. **Diário Oficial da União**. República Federativa do Brasil – Imprensa Nacional. Brasília, 20 jan. 2015. Disponível em: <<http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=1&pagina=1&data=20/01/2015>>. Acesso em: 14 set. 2018.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Setor Elétrico**. Disponível em: <[https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/onde-atuamos/setor\\_eletrico?\\_adf.ctrl-state=11ynq22shm\\_30&\\_afLoop=98074654634204#!](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/setor_eletrico?_adf.ctrl-state=11ynq22shm_30&_afLoop=98074654634204#!)>. Acesso em: 28 set. 2018.

CHADWICK, A.; MORFETT, J.; BORTHWICK, M. **Hidráulica para engenharia civil e ambiental**. Tradução de: *Hydraulics in civil and environmental engineering* por Tibério Júlio Couto Novais. 5. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **História da eletricidade no Brasil: energia no Brasil**. Disponível em: <[http://www.cemig.com.br/pt-br/a\\_cemig/Nossa\\_Historia/Paginas/historia\\_da\\_eletricidade\\_no\\_brasil.aspx](http://www.cemig.com.br/pt-br/a_cemig/Nossa_Historia/Paginas/historia_da_eletricidade_no_brasil.aspx)>. Acesso em: 28 set. 2018.

ELETROBRÁS - CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. **Diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Rio de Janeiro: Memória da Eletricidade, 2000.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2017: ano base 2016**. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2017.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf)>. Acesso em: 25 set. 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília, 2007. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-PNE-2030>>. Acesso em: 27 set. 2018.

\_\_\_\_\_. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**, Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/PDE2026.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2018.

ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. **Hydraulic civilization**. Disponível em: <<https://www.britannica.com/topic/hydraulic-civilization>>. Acesso em: 25 set. 2018.

FERREIRA NETO, A.B.; CORREA, W. L. R.; PEROBELLI, F. S. Consumo de Energia e Crescimento Econômico: uma Análise do Brasil no período 1970-2009. **Análise Econômica**, ano 34, n.65, p.181-204. Porto Alegre, mar. 2016.

FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho**. Tradução de: *Lighting the way: toward a sustainable energy future*, 2007, por Maria Cristina Vidal Borba, Neide Ferreira Gaspar. São Paulo: FAPESP, 2010.

FUNDO MONETÁRIO INTERCIONAL. **World Economic Outlook Database**. Atualização de abril de 2017.

GUICCIARDINI, N. **Reading the Principia: The Debate on Newton's Mathematical Methods for Natural Philosophy from 1687 to 1736**. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Statics**. Disponível em: <<https://www.iea.org>>. Acesso em: 27 set. 2018.

\_\_\_\_\_. **Technology Roadmap: Hydropower**. Paris, 2012. Disponível em: <[https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/2012\\_Hydropower\\_Roadmap.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/2012_Hydropower_Roadmap.pdf)>. Acesso em: 25 out. 2018.

INTERNATIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION. **A brief history of hydropower**. Disponível em: <<https://www.hydropower.org/a-brief-history-of-hydropower>>. Acesso em: 28 set. 2018.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY - IRENA. **Renewable energy technologies: cost analysis series**. IRENA Working Paper, 2012. Disponível em: <[https://www.irena.org/documentdownloads/publications/re\\_technologies\\_cost\\_analysis-hydropower.pdf](https://www.irena.org/documentdownloads/publications/re_technologies_cost_analysis-hydropower.pdf)>. Acesso em: 29 set. 2018.

INSTITUTO HUMANITAS UNISINOS. **Ecodebate**, 19 Set. 2009. IHU On-line [IHU On-line é publicado pelo Instituto Humanitas Unisinos – IHU, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos, em São Leopoldo, RS.]. Disponível em: <<https://www.ecodebate.com.br/2009/09/19/as-pequenas-centrais-hidreletricas-e-o-seu-impacto-ambiental-entrevista-especial-com-geraldo-lucio-tiago-filho/>>. Acesso em: 29 set. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. Disponível em <<http://www.inee.org.br/>>. Acesso em 3 nov. 2018.

MAUAD, F. F. **Aproveitamentos hidrelétricos**. São Carlos, EESC-SHS, 2004.

MELLO JR. **Mackenzie**. Notas de aula do professor Antônio Mello Júnior. Engenharia Mecânica. Disponível em: <<http://meusite.mackenzie.com.br/mellojr/>>. Acesso em: 4 out. 2018.

NILTON, C. L. **O impacto das pequenas centrais hidrelétricas: PCHs no meio ambiente**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação Latu Sensu Formas Alternativas de Energia - Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, 2009.

UNITED NATIONS. United Nations Conference on Trade and Development. Trade and Development Board. **The future matrix and renewable energy: implications for energy and food security**. Genebra, 2010.

PEREIRA, G. M. **Projetos de usinas hidrelétricas passo a passo**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

PONT DU GARD. **História de uma ponte notável**. Disponível em: <<http://pontdugard.com/pt/pont-du-gard/historia-de-uma-ponte-notavel>>. Acesso em: 3 nov. 2018.

QGA. **O caderno de anotações de Leonardo da Vinci**. Disponível em: <<http://qga.com.br/arte-cultura/2014/04/o-caderno-de-anotacoes-de-leonardo-da-vinci>>. Acesso em: 3 nov. 2018.

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21st CENTURY. **Renewables 2016 Global Status Report 2016**. Disponível em: <[http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/05/GSR\\_2016\\_Full\\_Report\\_lowres.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/05/GSR_2016_Full_Report_lowres.pdf)>. Acesso em: 24 set. 2018.

ROUSE, H; INCE, S. **Highlights in the history of hydraulics**. Iowa City: Institute of Hydraulic Research, 1957.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY'S. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/>>. Acesso em: 22 Set. 2018.

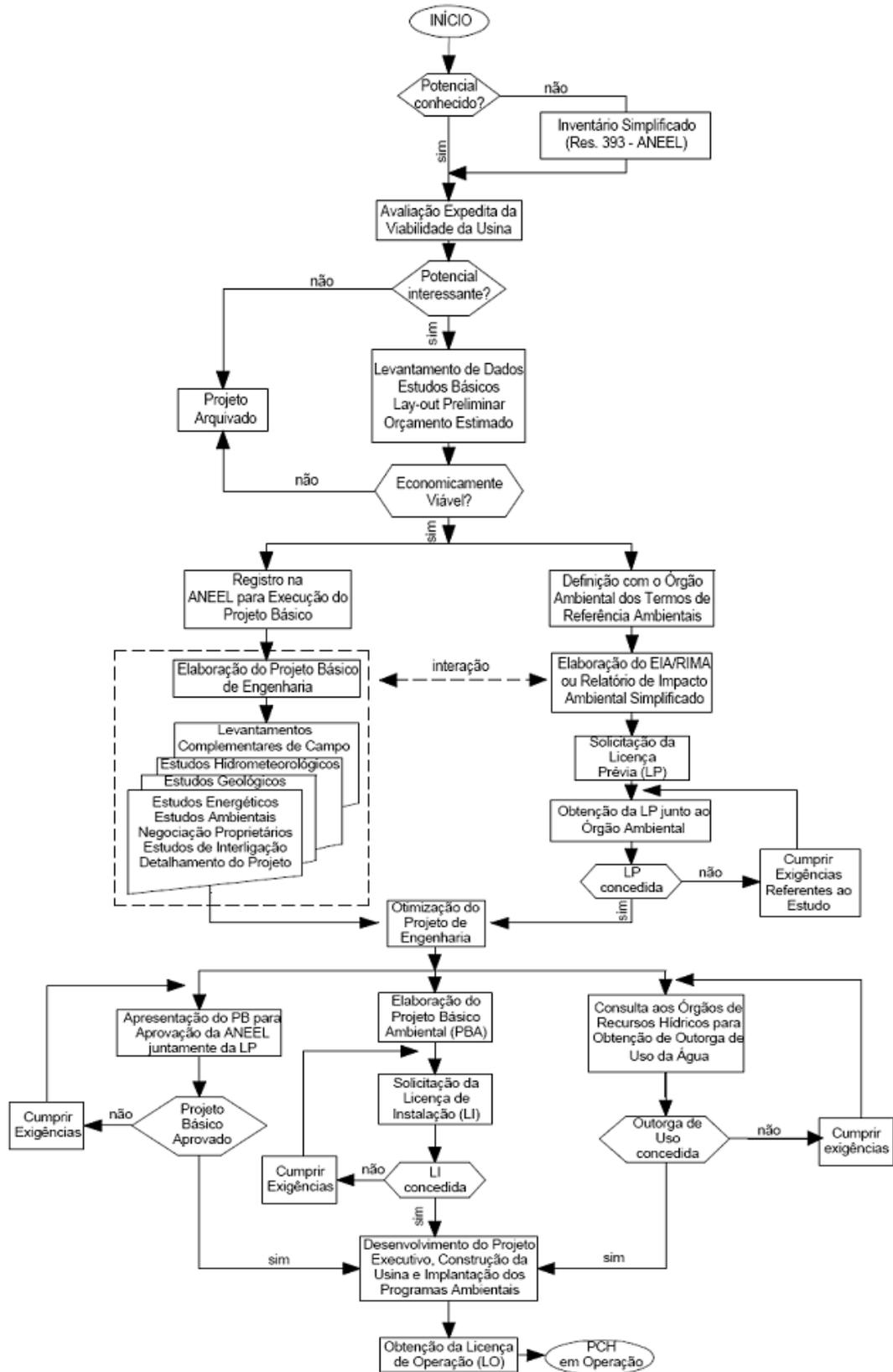
VALBUSA, L. A. Mais hidrelétricas, por favor! **ABRAPCH – Associação Brasileira de PCHs e CGHs**, 2018. Disponível em: <<http://www.abrapch.org.br/artigos/17/mais-hidreletricas-por-favor>>. Acesso em 29: set. 2018.

VOITH. **Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs)**. Disponível em: <<http://voith.com/br/index.html>>. Acesso em: 06 out. 2018.

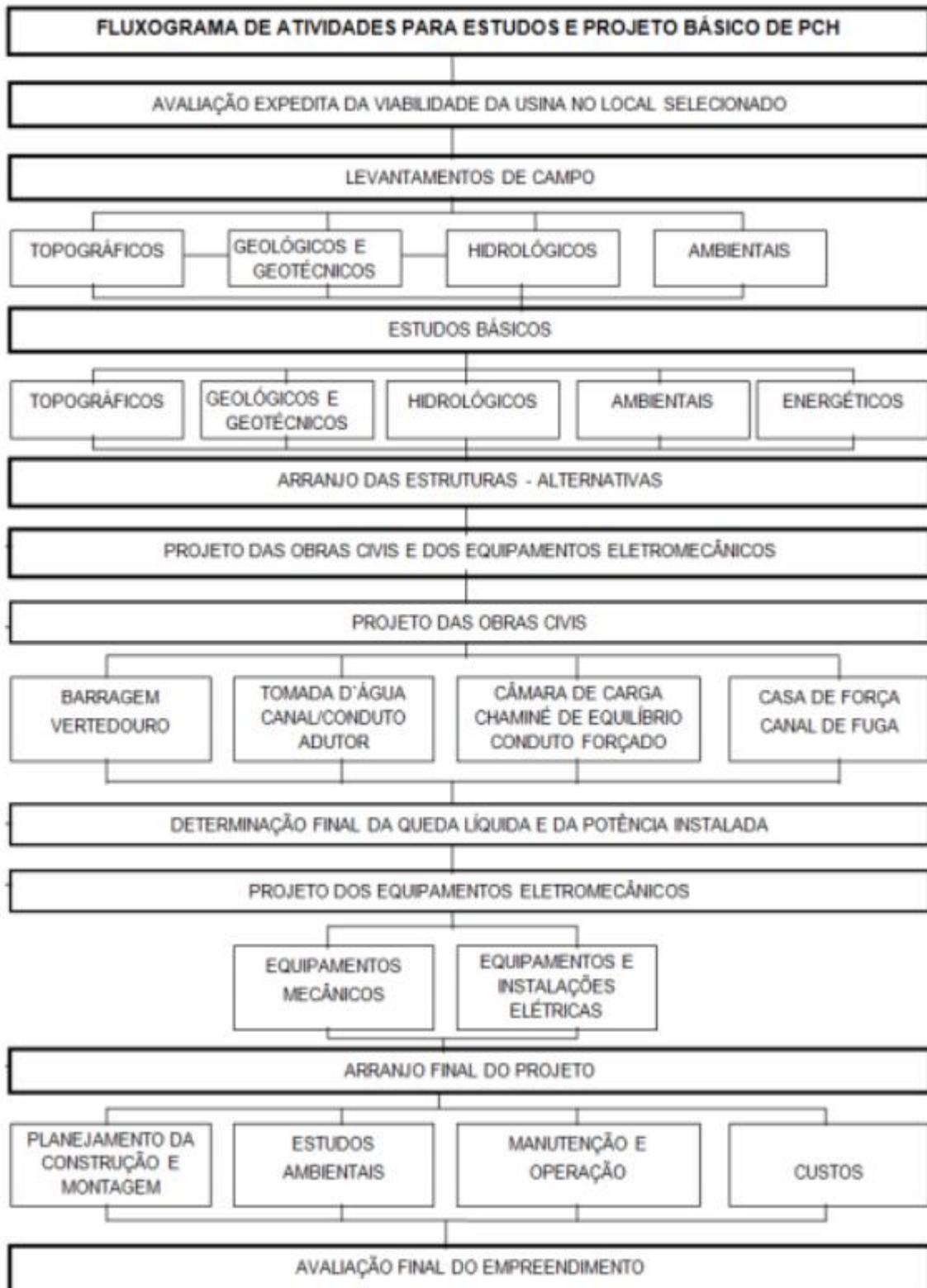
WALTER TOOLS. Disponível em: <<https://www.walter-tools.com/>>. Acesso em: 5 out. 2018.

WORLD ENERGY COUNCIL. **World Energy Resources 2016**. Disponível em: <[https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources\\_Hydropower\\_2016.pdf](https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources_Hydropower_2016.pdf)>. Acesso em: 22 ago. 2018.

ANEXO I – Fluxograma de Implantação de uma PCH – Eletrobrás



ANEXO II – Fluxograma de Atividades para Estudos e Projeto Básico de uma  
PCH – Eletrobrás



## ANEXO III – Nota do MMA sobre Efeito Estufa e Aquecimento Global

O efeito estufa é um fenômeno natural e possibilita a vida humana na Terra.

Parte da energia solar que chega ao planeta é refletida diretamente de volta ao espaço, ao atingir o topo da atmosfera terrestre - e parte é absorvida pelos oceanos e pela superfície da Terra, promovendo o seu aquecimento. Uma parcela desse calor é irradiada de volta ao espaço, mas é bloqueada pela presença de gases de efeito estufa que, apesar de deixarem passar a energia vinda do Sol (emitida em comprimentos de onda menores), são opacos à radiação terrestre, emitida em maiores comprimentos de onda. Essa diferença nos comprimentos de onda se deve às diferenças nas temperaturas do Sol e da superfície terrestre.

De fato, é a presença desses gases na atmosfera o que torna a Terra habitável, pois, caso não existissem naturalmente, a temperatura média do planeta seria muito baixa, da ordem de 18°C negativos. A troca de energia entre a superfície e a atmosfera mantém as atuais condições, que proporcionam uma temperatura média global, próxima à superfície, de 14°C.

Quando existe um balanço entre a energia solar incidente e a energia refletida na forma de calor pela superfície terrestre, o clima se mantém praticamente inalterado. Entretanto, o balanço de energia pode ser alterado de várias formas: (1) pela mudança na quantidade de energia que chega à superfície terrestre; (2) pela mudança na órbita da Terra ou do próprio Sol; (3) pela mudança na quantidade de energia que chega à superfície terrestre e é refletida de volta ao espaço, devido à presença de nuvens ou de partículas na atmosfera (também chamadas de aerossóis, que resultam de queimadas, por exemplo); e, finalmente, (4) graças à alteração na quantidade de energia de maiores comprimentos de onda refletida de volta ao espaço, devido a mudanças na concentração de gases de efeito estufa na atmosfera.

Essas mudanças na concentração de gases de efeito estufa na atmosfera estão ocorrendo em função do aumento insustentável das emissões antrópicas desses gases.

As emissões de gases de efeito estufa ocorrem praticamente em todas as atividades humanas e setores da economia: na agricultura, por meio da preparação da terra para plantio e aplicação de fertilizantes; na pecuária, por meio do tratamento de dejetos animais e pela fermentação entérica do gado; no transporte, pelo uso de combustíveis fósseis, como gasolina e gás natural; no tratamento dos resíduos sólidos, pela forma como o lixo é tratado e disposto; nas florestas, pelo desmatamento e degradação de florestas; e nas indústrias, pelos processos de produção, como cimento, alumínio, ferro e aço, por exemplo. Elemento opcional, texto ou documento não elaborado pelo autor, que serve de fundamentação, comprovação e ilustração.

Há quatro principais gases de efeito estufa (GEE), além de duas famílias de gases, regulados pelo Protocolo de Quioto:

O dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) é o mais abundante dos GEE, sendo emitido como resultado de inúmeras atividades humanas como, por exemplo, por meio do uso de combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural) e também com a mudança no uso da terra. A quantidade de dióxido de carbono na atmosfera aumentou 35% desde a era industrial, e este aumento deve-se a atividades humanas, principalmente pela queima de combustíveis fósseis e remoção de florestas. O  $\text{CO}_2$  é utilizado como referência para classificar o poder de aquecimento global dos demais gases de efeito estufa;

O gás metano ( $\text{CH}_4$ ) é produzido pela decomposição da matéria orgânica, sendo encontrado geralmente em aterros sanitários, lixões e reservatórios de hidrelétricas (em maior ou menor grau, dependendo do uso da terra anterior à construção do reservatório) e também pela criação de gado e cultivo de arroz. Com poder de aquecimento global 21 vezes maior que o dióxido de carbono;

O óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) cujas emissões resultam, entre outros, do tratamento de dejetos animais, do uso de fertilizantes, da queima de combustíveis fósseis e de alguns processos industriais, possui um poder de aquecimento global 310 vezes maior que o  $\text{CO}_2$ ;

O hexafluoreto de enxofre ( $\text{SF}_6$ ) é utilizado principalmente como isolante térmico e condutor de calor; gás com o maior poder de aquecimento, é 23.900 vezes mais ativo no efeito estufa do que o  $\text{CO}_2$ ;

O hidrofluorcarbonos (HFCs), utilizados como substitutos dos clorofluorcarbonos (CFCs) em aerossóis e refrigeradores; não agredem a camada de ozônio, mas têm, em geral, alto potencial de aquecimento global (variando entre 140 e 11.700);

Os perfluorcarbonos (PFCs) são utilizados como gases refrigerantes, solventes, propulsores, espuma e aerossóis e têm potencial de aquecimento global variando de 6.500 a 9.200.

Os hidrofluorcarbonos e os perfluorcarbonos pertencem à família dos halocarbonos, todos eles produzidos, principalmente, por atividades antrópicas.

Embora o clima tenha apresentado mudanças ao longo da história da Terra, em todas as escalas de tempo, percebe-se que a mudança atual apresenta alguns aspectos distintos. Por exemplo, a concentração de dióxido de carbono na atmosfera observada em 2005 excedeu, e muito, a variação natural dos últimos 650 mil anos, atingindo o valor recorde de 379 partes por milhão em volume (ppmv) - isto é, um aumento de quase 100 ppmv desde a era pré-industrial.

Outro aspecto distinto da mudança atual do clima é a sua origem: ao passo que as mudanças do clima no passado decorreram de fenômenos naturais, a maior parte da atual mudança do clima, particularmente nos últimos 50 anos, é atribuída às atividades humanas.

A principal evidência dessa mudança atual do clima é o aquecimento global, que foi detectado no aumento da temperatura média global do ar e dos oceanos, no derretimento generalizado da neve e do gelo, e na elevação do nível do mar, não podendo mais ser negada.

Atualmente, as temperaturas médias globais de superfície são as maiores dos últimos cinco séculos, pelo menos. A temperatura média global de superfície aumentou cerca de 0,74°C, nos últimos cem anos. Caso não se atue neste aquecimento de forma significativa, espera-se observar, ainda neste século, um clima bastante incomum, podendo apresentar, por exemplo, um acréscimo médio da temperatura global de 2°C a 5,8°C, segundo o 4º Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), de 2007.

Em resumo, a primeira parte do 4º relatório do IPCC, que compila os estudos sobre base científica da mudança do clima, considera o aquecimento global um fenômeno inequívoco e, muito provavelmente, causado pelas atividades antrópicas. A comunidade científica tem tido um papel importante para subsidiar os países em sua tomada de decisão, fornecendo projeções da mudança do clima sob diferentes cenários futuros, dentro de margens de erro aceitáveis, indicando desafios e apontando oportunidades.