

IVAN MANTELLATTO DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DA INSTALAÇÃO DE
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM RESERVATÓRIOS DE
HIDRELÉTRICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Engenharia
de São Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Sistema de Energia e
Automação

Orientador: Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad

São Carlos

2018

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

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

M048a Mantellatto de Oliveira, Ivan
ANÁLISE DA VIABILIDADE DA INSTALAÇÃO DE SISTEMAS FOTVOLTAICOS EM RESERVATÓRIOS DE HIDRELÉTRICAS / Ivan Mantellatto de Oliveira; orientador Frederico Fábio Mauad. São Carlos, 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, 2018.

1. Fontes Renováveis. 2. Energia Fotovoltaica. 3. Sistemas Fotovoltaicos Flutuantes. 4. Geração Híbrida Fotovoltaica e Hidrelétrica. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Ivan Mantellatto de Oliveira

Título: “Análise da viabilidade da instalação de sistemas fotovoltaicos em reservatórios de hidrelétricas”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 27/11/18,

com NOTA 7,0 (sete), pela Comissão Julgadora:

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

Mestre Bruno Bernardo dos Santos - Doutorando - EESC/USP

Mestre Carlos Henrique Beuter - Doutorando - EESC/USP

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

Dedicatória

Agradeço à minha família a quem eu devo tudo, meu pai Valter, minha mãe Ivana e ao meu irmão Mateus, pela educação, carinho, suporte, confiança, companheirismo e outras infinitas razões.

A minha namorada Natália que sempre esteve ao meu lado me apoiando e incentivando.

Aos meus amigos Augusto, Caio, Gabriel, Lucas, Rafael e Renan, pela convivência durante este curso e pela ajuda no enfrentamento dos mais diversos desafios da graduação.

A todos os funcionários da Escola de Engenharia de São Carlos, em especial a todos os professores que lecionaram durante à minha graduação contribuindo para minha formação e para a realização desse trabalho.

Ao professor Frederico Fabio Maud pela orientação desse trabalho e todas as aulas ministradas.

A todos que de alguma maneira contribuíram para a minha formação acadêmica e para a realização desse trabalho.

Sumário

Capítulo 1	9
1.1 Introdução	9
1.2 Objetivo	10
Capítulo 2	11
2.1 Panorama Energético Mundial	11
2.2 Panorama Energético Brasileiro	15
2.2.1 Oferta de Energia e Potência	15
2.2.2 Sistema Interligado Brasileiro.....	17
2.3 Oferta da Geração Fotovoltaica no Mundo	18
2.4 Oferta da Geração fotovoltaica no Brasil	21
Capítulo 3	24
3. A Energia Fotovoltaica	24
3.1 História	24
3.3 Módulos Fotovoltaicos	26
3.4 Componentes principais dos sistemas fotovoltaicos	27
Capítulo 4	31
4.1 Sistemas Híbridos Hidrelétricos Fotovoltaicos	31
4.2 Hidrelétricas	34
4.3 Sistemas Fotovoltaicos.....	36
4.3.3 Sistemas em Flutuantes em Operação	44
Capítulo 5	46
5.1 Conclusão	46
Referências Bibliográficas	48

Lista de Figuras

Figura 1: Projeção para o Consumo de energia mundial.....	12
Figura 2: Os 10 maiores produtores de energia elétrica.....	13
Figura 3: Consumo de energia por fontes.....	14
Figura 4: Média da Taxa de Crescimento Anual das Fontes Renováveis no últimos 25 anos.....	15
Figura 5: Oferta Interna de Energia Elétrica 2016.....	16
Figura 6: Participação das fontes na geração de energia elétrica.....	17
Figura 7: Crescimento da Capacidade Instalada de Energia Solar Fotovoltaica no Mundo.....	19
Figura 8: Participação da Energia Solar na matriz dos países.....	20
Figura 9: Tendência do crescimento da capacidade instalada e energia solar gerada.....	22
Figura 10: Média anual Irradiação solar Diária plano inclinado.....	22
Figura 11: Esquemático sistema Híbrido de uma barra CC.....	32
Figura 12: Esquemático sistema Híbrido de duas barras.....	33
Figura 13: Esquemático (b) sistema Híbrido de duas barras.....	33
Figura 14: Evolução das Usinas Hidrelétricas por região no Brasil.....	34
Figura 15: Histórico do fator de Capacidade das Hidrelétricas Brasileiras.....	35
Figura 16: Balanço entre água e energia. Letra (a) o sistema sem painéis e letra (b) sistema com painéis instalados.....	40
Figura 17: Estrutura flutuante do sistema flutuante.....	41
Figura 18: Componente <i>HYDRELIO</i> patenteado pela empresa <i>Ciel et terre</i>	43
Figura 19: Conceito de painel fotovoltaico submersível.....	44
Figura 20: Usina Piloto Flutuante em Alto Rabagão, Portugal.....	45

Resumo

O aumento da participação da energia renovável no atual cenário mundial de geração de energia é decorrente do crescimento da demanda energética e da necessidade de se preservar os recursos naturais. Dentre as alternativas, a geração fotovoltaica aparece com um grande potencial de desenvolvimento, pois, tem grande disponibilidade e custo benefício viável se comparada as existentes. Países europeus como Alemanha, Espanha e Portugal já apresentam significativa participação de geração solar na matriz. Buscando participar desse mercado, cada vez mais os países em crescimento investem nesse tipo de geração. O Brasil por apresentar fatores geográficos favoráveis tem grande potencial para o crescimento desse recurso que é pouco explorado no país. A geração hidráulica é responsável por mais de 60% da oferta brasileira. Recentemente as usinas sofreram com a restrição hídrica nos reservatórios, o que ocasionou no acionamento das termelétricas com maior frequência. Essa situação de dependência em relação a uma única fonte poderia ser evitada se o país investisse na diversificação da matriz energética nacional. A proposta para um sistema híbrido de geração onde uma usina hidrelétrica operaria em conjunto com uma usina fotovoltaica é aplicável diante da disponibilidade dos recursos brasileiros e da complementariedade entre essas duas fontes. A construção de um sistema fotovoltaico flutuante como fonte do sistema híbrido é interessante pelo fato de já existirem grandes reservatórios de hidrelétricas e aparece como um potencial em desenvolvimento para impulsionar a participação da energia solar na matriz brasileira.

Palavras Chaves: Fontes Renováveis; Geração de Energia; Energia Fotovoltaica; Sistemas Fotovoltaicos Flutuantes; Geração Híbrida Fotovoltaica e Hidrelétrica.

Abstract

The increase of renewable energy in the current global scenario of energy generation is due to the growth of energy demand and the need to conserve natural resources. As an alternative, a photovoltaic generation appears with a great potential of development, because the great value and the cost are compared as existing sources. European countries such as Germany, Spain and Portugal already have a significant participation of solar generation in the energy matrix. Seeking the business, more and more growing countries invest in this type of generation. Brazil because it presents favorable geographical factors has great potential for the development of the resource but that is little explored in the country. The hydraulic is responsible for more than 60% of the Brazilian supply. Recently, the companies suffered with the low water levels in the reservoirs, which caused the activation of thermoelectric plants with more frequency. This situation of dependence on a single source could be avoided if the country invested in the diversification of the national energy matrix. The proposal for a hybrid system of joint generation of a hydroelectric plant with a photovoltaic plant is applicable from the natural resources and the complementary feeding between these two sources. The proposal of a floating photovoltaic system is interesting through the fact that there are large hydroelectric reservoirs and it appears as a potential for the development of a participation of solar energy in the Brazilian matrix.

Keywords: Renewable Sources; Power generation; Photovoltaics; Floating Photovoltaic Systems, Hybrid Generation Photovoltaic and Hydroelectric

Capítulo 1

1.1 Introdução

A população mundial cresce em ritmo acelerado, segundo a ONU no ano de 2017 a população global chegou a 7,6 bilhões e em 2030 deve atingir o número de 8,6 bilhões de habitantes resultando no aumento da demanda de energia elétrica em um futuro próximo. [1] A recente mudança no estilo de vida da sociedade, causada principalmente pela introdução da tecnologia, contribuiu para que se atingisse a marca de 24.790 TWh [Terawatt-hora] de energia elétrica consumida no mundo em 2016. [2]

O maior desafio para atender essa demanda de energia elétrica crescente consiste no equilíbrio entre gerar energia e preservar os recursos naturais. Atualmente as principais fontes de geração de eletricidade no mundo são não renováveis, ou seja, são finitas e ainda causam impacto ambiental negativo. Atualmente, o carvão mineral e o gás natural são as principais fontes de energia elétrica representando 60% da oferta mundial. Dentre as renováveis, a energia hidráulica é a que ocupa a maior parcela de participação com 16,2%. [3]

A necessidade de se investir em fontes renováveis aumenta o desenvolvimento de energias alternativas, que ganham cada vez mais destaque no mercado de energia mundial. A dependência em relação aos fatores climáticos para geração é uma das dificuldades para esse tipo de geração. A energia solar aparece nesse cenário com alto potencial de crescimento, devido principalmente pela grande disponibilidade desse recurso e baixo custo de manutenção dos sistemas fotovoltaicos.

O potencial da energia fotovoltaica mundial cresceu mais de 10 vezes no período entre o ano de 2008 e 2015, atingindo 177GWp [Gigawatt pico] de potencial instalado. [4] Apesar da favorável posição geográfica do Brasil com altos índices de irradiação solar e dos incentivos fiscais concedidos recentemente por parte do governo, a parcela ocupada por esse tipo de geração na matriz energética é pequena, apresentando 137 MW de potência instalada com registro na ANEEL, o que equivale a menos de 1% da capacidade de geração elétrica do país. [5]

A instalação de sistemas híbridos hidrelétrico fotovoltaico pode representar um caminho à diversificação da matriz energética, aproveitando dos recursos já existentes e da complementariedade entre as duas fontes.

A tecnologia de sistemas fotovoltaicos flutuantes começou se desenvolver recentemente e se apresenta como uma interessante proposta para construção e crescimento da geração solar. Essa ideia foi motivada principalmente para atender a demanda de energia

nos sistemas de irrigações modernos, onde a estrutura do sistema é instalada sobre os lagos próximos ao local de consumo. Apesar de estar em desenvolvimento, já é possível prever benefícios em relação as instalações convencionais, como melhor rendimento dos painéis e diminuição na evaporação no reservatório. [6]

A organização do desenvolvimento do trabalho foi feita em três capítulos. Capítulo 2 descreve o panorama atual de energia mundial e brasileiro, com informações de relatórios recentes e tendências futuras sobre geração de energia elétrica. Descreve também o crescimento e uso da energia solar para geração de energia elétrica no mundo e no Brasil. O capítulo 3 consta de um breve resumo da história da energia solar e descrição dos sistemas fotovoltaicos. O capítulo 4 apresenta a configuração de um sistema híbrido hidrelétrico fotovoltaico, assim como descreve resumidamente a fonte hídrica e mais detalhadamente a fotovoltaica, introduzindo inclusive o conceito de painéis solares flutuantes

1.2 Objetivo

O objetivo desse estudo é apresentar uma análise descritiva do funcionamento de um sistema híbrido fotovoltaico e como ele contribuiria para a matriz energética brasileira. Será apresentado também a análise da geração de energia mundial e da geração fotovoltaica e das tendências para o futuro. Um breve resumo da história da energia solar e descrição técnica dos elementos de um sistema fotovoltaico centralizado e distribuído.

Capítulo 2

O crescimento da demanda energética ocorrido nas últimas décadas é representado pelos números apresentados nesse capítulo, que foram baseados em relatórios internacionais e nacionais. Também é descrito as tendências da mudança da matriz energética mundial e incluída nessa tendência, é apresentado com mais detalhes o crescimento da energia solar que tem alto potencial de crescimento no conforme as informações apresentadas nesse capítulo.

2.1 Panorama Energético Mundial

No século XIX ocorreu o desenvolvimento industrial e tecnológico exigindo que se desenvolvesse paralelamente a eles os sistemas de energia elétrica para garantir o atendimento da demanda energética de forma confiável e conseqüentemente, o desenvolvimento da tecnologia, dos meios de produção e dos transportes.

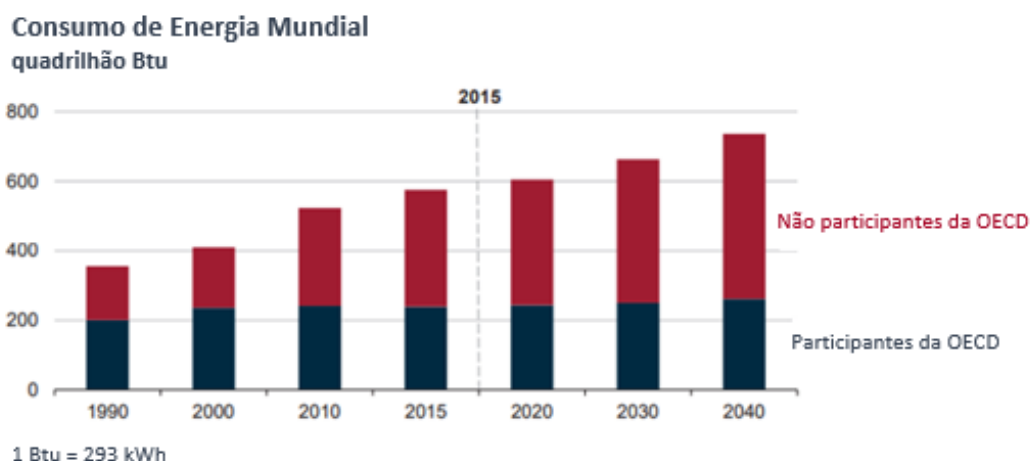
Os sistemas de Transmissão de energia que hoje existem pelo mundo são prova do desenvolvimento dos sistemas elétricos. O exemplo mais representativo é a interligação do leste dos Estados Unidos que abrange uma área de 8,85 milhões de quilômetros quadrados e fornece energia para aproximadamente 228 milhões de consumidores com alta confiabilidade. [7] A China, país que mais cresce no mundo, não apresenta sistemas tão bem desenvolvidos, mas está investindo para que se consiga suprir toda a demanda energética do país (instalou um valor próximo a 85 GW de potência em quatro anos). Talvez fique claro no exemplo mais recente da China que não é possível se desenvolver sem investir em uma base energética sólida.

Há uma grande diferença no consumo energético entre os países causado principalmente pela diferença do nível de desenvolvimento entre eles. Há uma relação proporcional entre o consumo de energia e o PIB do país, ou seja, quanto maior o PIB do país maior tende ser o consumo de energia per capita deste se comparado a outro com PIB menor. Há ainda outros fatores que possuem influência nessa comparação de consumo energético entre os países, como por exemplo, a posição geográfica, a densidade populacional e os tipos de indústrias em atividade.

Exemplos dos fatores citados anteriormente são a Noruega e Canadá, países localizados mais ao extremo norte da Terra e necessitando de energia para o aquecimento dos ambientes, a Austrália e Rússia, que por possuir baixa densidade demográfica dedicam grande parte da energia para o transporte e os Estados Unidos que possui grande atividade industrial, exigindo uma grande demanda de energia para esse setor. [7]

A *Energy International Administration* (EIA), Agência Internacional de Energia, publicou um documento chamado *International Energy Outlook 2017* [8] no qual foi realizada uma projeção para o consumo de energia no mundo. Segundo o documento a geração de energia aumentará cerca de 28% entre os anos de 2015 e 2040 [8]. O importante a se destacar é o crescimento da demanda energética mundial que é liderado principalmente pelos países que não fazem parte do grupo OECD (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) como mostra a Figura 1. A crise econômica mundial, que ocorreu principalmente entre os anos 2007 e 2008, afetou principalmente os países mais desenvolvidos os quais a maioria fazem parte do grupo OECD, diminuindo os produtos manufaturados destes países e consequentemente o consumo de energia das indústrias. O grupo NON-OECD representa os países subdesenvolvidos, como por exemplo, China, Índia e países Africanos, como Gana e Etiópia, que apresentam variação positiva na economia e também crescimento populacional expressivo, liberando assim o crescimento da demanda energética mundial nas próximas décadas.

Figura 1: Projeção para o Consumo de energia mundial.



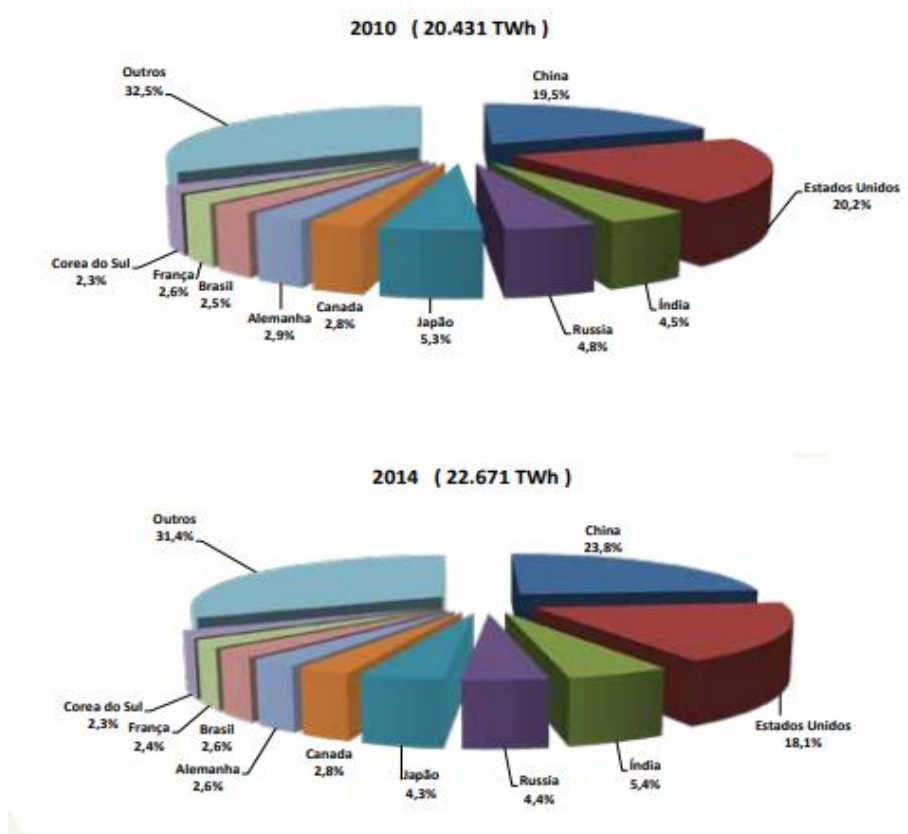
Fonte: Adaptado de [2]

A China e os Estados Unidos são os países que dominam a produção mundial de energia elétrica, juntos geram mais de 40% da produção mundial, seguidos por Índia, Rússia, Japão, Canadá, Alemanha, França, Brasil e Coreia do Sul. [8] A Figura 2 mostra a evolução dos dez maiores países produtores de energia elétrica do mundo.

Outra parte do documento da EIA se refere aos dados do consumo dos principais insumos de base energética no mundo e a projeção para o futuro. A figura 3, também retirada do relatório, indica o crescimento expressivo das fontes renováveis e do gás natural. O uso do petróleo e seus derivados também deverão crescer em ritmo menos acentuado. Já o carvão deverá perder espaço e a energia nuclear se manter em ritmo constante.

A Energia Hidrelétrica é a que lidera entre as fontes renováveis no mundo, sendo a principal fonte de energia para mais de 30 países e representando cerca de 16,5% de toda a produção mundial de eletricidade [8]. A dificuldade para o crescimento de instalações hidrelétricas é o fato de que ela está saturada na maioria dos países desenvolvidos que já exploraram os seus recursos hídricos e apresentam poucos projetos de hidrelétricas para o futuro. O crescimento da energia renovável deverá, então, ser liderado pela energia solar, eólica e de biomassa, sustentado pelo desenvolvimento tecnológico e pelas políticas governamentais de incentivo ao uso dessas fontes em busca de uma matriz energética mais sustentável.

Figura 2: Os 10 maiores produtores de energia elétrica.



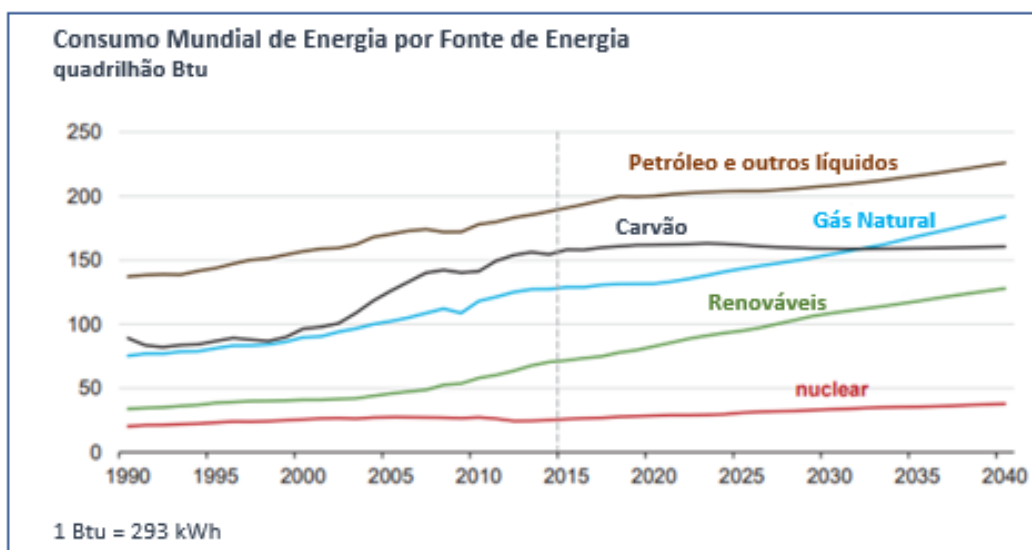
Fonte: Adaptado [4]

Entre as fontes de energia não renováveis, destaca-se na matriz energética mundial o petróleo, o gás natural, o carvão e a energia nuclear. Apesar da tendência ser o crescimento das energias renováveis como mostrado na figura 3, o petróleo deve permanecer como principal fonte de energia primária por muito tempo, crescendo principalmente nos setores industriais e de transporte, mas tendo declínios no setor elétrico. O crescimento do consumo do gás natural deve ocorrer pelo fato dele estar substituindo outros combustíveis fósseis, principalmente nas termoeletricas.

O carvão apresentou expressivo crescimento na participação da matriz energética mundial entre os anos de 1970 e 2010, principalmente pelo fato de a China ter crescido muito nesse período e esse insumo ser a base energética do país, mas deverá perder forças nas próximas décadas, perdendo espaço para geração de energia elétrica para o gás natural e para a energia nuclear. Alguns países não desenvolvidos deverão continuar aumentando o consumo do carvão, como por exemplo, a Índia. A maior parte da produção do carvão ocorre na Ásia, liderado pela China, e pelo Estados Unidos.

Já a Energia Nuclear, que cresceu entre os anos de 1970 e 1980, ficou estagnada e apresenta uma taxa de crescimento muito baixa. Apesar de ter despertado o interesse de muitos países esse tipo de geração ainda é considerada perigosa em relação ao tratamento dos resíduos radioativos e a segurança, acidentes como a planta japonesa (Fukushima) reabriram a discussão sobre o uso desse tipo de fonte recentemente e influenciaram para o fechamento de várias plantas na Europa, como por exemplo na Alemanha e na Suíça que fecharam os reatores nucleares.

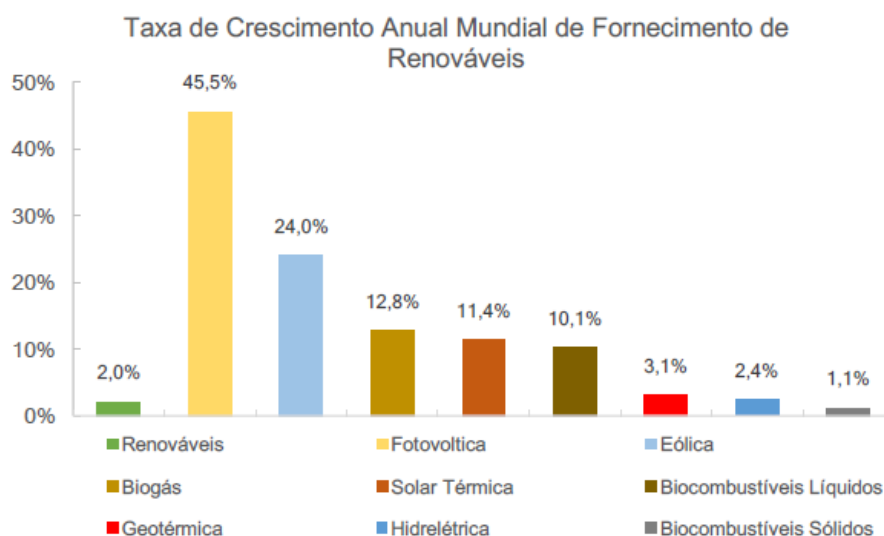
Figura 3: Consumo de energia por fontes.



Fonte: Adaptado de [2]

A geração de energias renováveis cresceu em média 2% ao ano nos últimos 25 anos. A energia fotovoltaica lidera a média da taxa de crescimento anual dessa parcela com 45,5%, a eólica fica em segundo lugar com 24% e biogás em terceiro lugar com 12,8%. A figura 4 ilustra esse panorama da média de crescimento anual.

Figura 4: Média da Taxa de Crescimento Anual das Fontes Renováveis no últimos 25 anos.



Fonte: [32]

2.2 Panorama Energético Brasileiro

2.2.1 Oferta de Energia e Potência

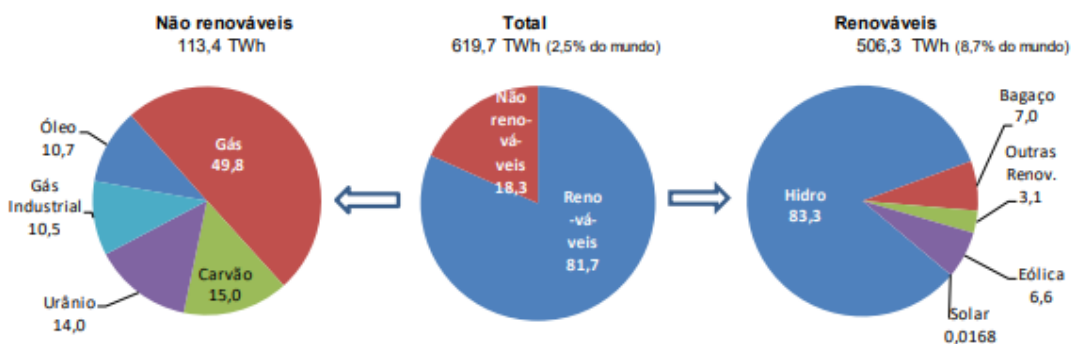
O cenário de geração de energia no Brasil a ser apresentado é baseado em um documento, Resenha Energética Brasileira 2017, do Ministério de Minas e Energia do Brasil [3]. O recuo da oferta interna de energia no país é consequência do recuo econômico. Segundo dados do MME a oferta de energia recuou 3,8% em 2016 em relação a 2015, proporcional ao PIB do país que recuou 3,6% no mesmo ano. Observa-se ainda um pequeno aumento da participação das fontes renováveis, destaque para as fontes eólica, hidráulica, solar e biomassa. O Brasil apresentou no ano de 2016 uma participação de 43,5% das fontes renováveis na matriz contra 56,5% das não renováveis no que se refere a matriz primária de energia. [3] Esse valor apresenta vantagem em relação aos países da OCDE, que tem em média 9,5% da participação de energia renovável, e em relação à média mundial que é de 14,2%.

O setor de Energia Elétrica Brasileiro caminhou em sentido oposto ao da matriz energética e apresentou em 2016 um crescimento na oferta interna de 0,7% em relação ao ano de 2015, ficando em 619,7 TWh. A geração hidráulica representa a maior participação na estrutura da Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) com 83,3%. As ofertas por óleo fóssil, gás natural e carvão mineral recuaram e a parcela de oferta das fontes renováveis aumentaram. Destaque para oferta eólica e solar, que cresceram respectivamente em 54,9% e 44,7% se comparado a participação ao ano anterior. [3]

Um fato importante a se destacar é a participação das fontes renováveis na OIEE no Brasil que chegou no ano de 2016 em 81,7% na participação, uma porcentagem bem elevada se comparada à média mundial de 23,6%. [3] A energia elétrica ofertada a partir do bagaço da cana, que parte é consumida pelo próprio produtor para a produção de açúcar e etanol e o excedente ofertado para o mercado, e a energia eólica são as fontes que mais se destacam. A oferta de Energia Solar apesar de apresentar alta taxa de crescimento ainda não é tão representativa na matriz como observa se na figura 5.

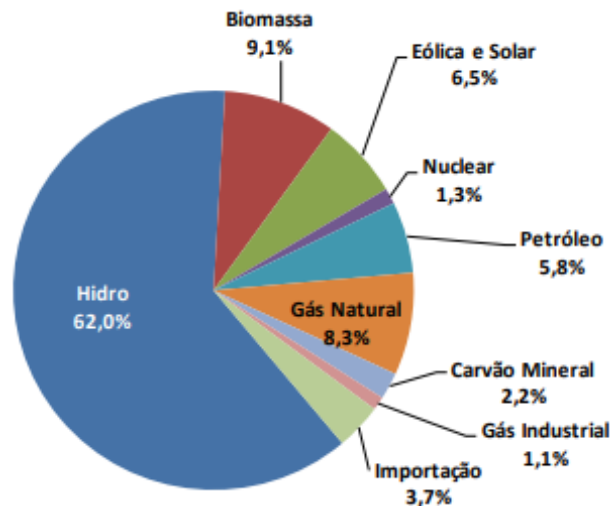
Em relação à Potência Instalada de Geração Elétrica houve um aumento de 9,6 GW do ano de 2015 (140,9 GW) para o ano de 2016 (150,4 GW) causado pela entrada de operação de novas usinas e expansão de outras unidades. Dividindo se as fontes, o aumento foi de 5.002 MW de UHE, 2.569 MW de Eólica, 1.759 MW de UTE, 208 MW de PCH e 52 MW de solar. Destaca se as expansões nas usinas hidrelétricas de Belo Monte (aproximadamente 2 GW), Teles Pires (1 GW) e Jirau 975 MW. Apesar da potência instalada ter aumentado, importou se aproximadamente 6 GW de potência no ano de 2016 para atender a demanda energética brasileira. [3] O gráfico da Figura 6 apresenta a oferta de potência de geração elétrica no Brasil no ano de 2016.

Figura 5: Oferta Interna de Energia Elétrica 2016.



Fonte: [3]

Figura 6: Participação das fontes na geração de energia elétrica.



Fonte: [3]

2.2.2 Sistema Interligado Brasileiro

A grande extensão dos sistemas de transmissão no Brasil, onde se estima que mais de 130 mil quilômetros de linha [9] cruzam o território nacional, é devido a distância dos centros consumidores aos geradores. Divide-se o sistema em duas grandes partes: o SIN (Sistema Interligado Nacional) que cobre a grande maioria das regiões brasileiras e o Sistema Isolado presente principalmente na região Norte.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) administra o SIN responsável por distribuir aproximadamente 96,6% da potência gerada no país. [9] A principal característica do sistema é a possibilidade de se alternar a fonte de energia da rede, selecionando conforme benefício financeiro e disponibilidade, as fontes mais viáveis no período. Por exemplo, é bem comum no Brasil a ativação das termelétricas quando os níveis dos reservatórios estão baixos e a estrutura do SIN colabora para que a manutenção e fornecimento de energia seja preservado. Outra vantagem é a possibilidade da transmissão de energia a uma região que passa por algum motivo uma crise energética sendo possível abastecer essa região com energia gerada em outra. O SIN é um sistema com características interessantes que contribuem para a confiabilidade na transmissão de energia elétrica do Brasil e ainda pode acompanhar o crescimento do setor elétrico do país pois é possível a integração de novas unidades assim como novas regiões. [9]

Diferentemente do SIN, que é abastecido predominantemente por hidrelétricas, os Sistemas Isolados são abastecidos principalmente por termelétricas. Cobrem principalmente os estados do Norte do país que são afastados da região centro Sul, sendo os maiores das

*capitais Rio Branco (AC) e Porto Velho (RO). Os sistemas são coordenados pelo grupo da Eletrobrás chamado Grupo Técnico Operacional da Região Norte (GTON).

Segundo o Ministério de Minas e Energia houve uma expansão de 4,4% no sistema de transmissão no ano de 2016. Em dezembro do mesmo ano, registrou-se a marca de 136,1 mil quilômetros, 5,7 mil a mais que o ano anterior. [9]

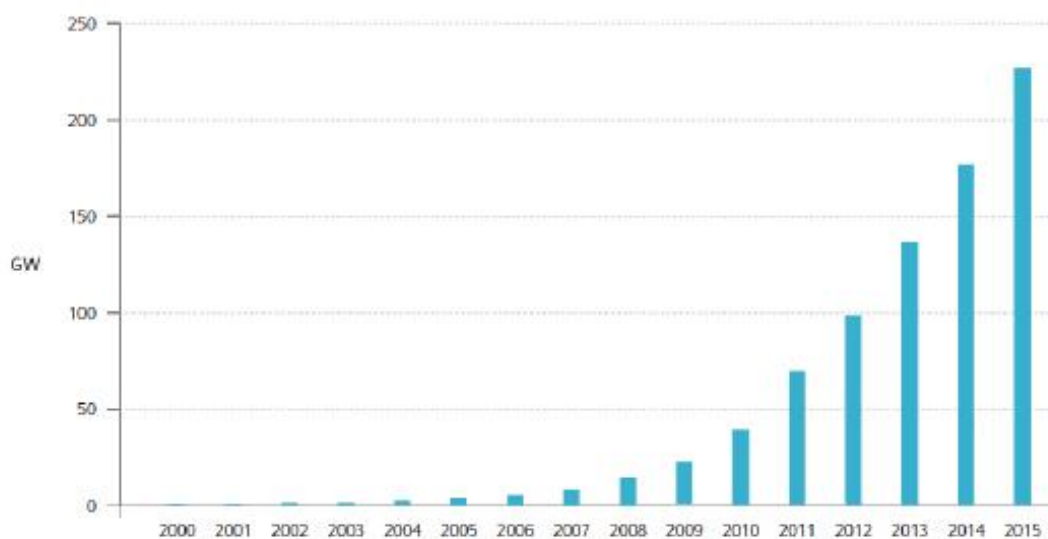
2.3 Oferta da Geração Fotovoltaica no Mundo

A energia solar apresenta capacidade para suprir toda a demanda energética mundial. Convertendo em números, a potência da incidência dos raios solares na atmosfera terrestre atinge aproximadamente $1,8 \times 10^{17}$ W dos quais resultam em uma insolação de 9×10^{16} W em toda superfície terrestre. Considerando que um painel fotovoltaico possui eficiência de 15% na taxa de conversão de energia solar para elétrica e que o uso primário de energia em potência consumida é de $1,8 \times 10^{13}$ W, utilizando aproximadamente 0,133% da energia disponível na superfície terrestre já seria o suficiente para satisfazer a demanda energética mundial. [7]

Destaca-se também a participação indireta da energia solar em outras fontes, como por exemplo a biomassa, já que ela fornece energia para o processo da fotossíntese, a energia eólica, responsável pela movimentação das massas de ar por convecção, e a energia hidrelétrica, responsável pela evaporação da água. Além da conversão em energia elétrica através do efeito fotovoltaico a energia solar pode ser aproveitada diretamente para o aquecimento de água, como é comumente visto em sistemas instalados nas residências.

Apesar de ainda ser pouco expressiva na matriz mundial, entre os anos de 1996 e 2006 sofreu um crescimento de 2.000% de potência gerada. No ano de 2015 atingiu a marca de 225 GWp [Gigawatt-pico] de potência instalada no mundo [10]. O crescimento exponencial da capacidade de potência instalada de energia solar no século XXI pode ser observado no gráfico da figura 7, onde desde 2003 vem crescendo significativamente e no ano de 2015 apresenta 25% de aumento em relação ao ano anterior (2014), crescendo cerca de 50 GWp. No gráfico da figura 6 é dividida a geração entre os países que participam do Programa de Sistemas de Energia Fotovoltaica da IEA (*IEA Photovoltaic Power Systems Programme*) e os que não participam.

Figura 7: Crescimento da Capacidade Instalada de Energia Solar Fotovoltaica no Mundo.



Fonte: Adaptado de [4]

No ano de 2015 a China começou a liderar o ranking dos maiores geradores de energia fotovoltaica com 43,5 GWp de potência instalada, em segundo lugar aparece a Alemanha com 39,7 GWp, em terceiro lugar EUA com 25,6 GWp e em quarto lugar a Itália com 18,9 GWp. No ano de 2015 os países que lideraram a ampliação da capacidade instalada foram respectivamente China, Japão e USA, responsáveis por 67% do crescimento desse respectivo ano. [11]

Observa-se que os países europeus estão perdendo espaço no cenário de geração solar e os asiáticos, liderados pela China e Japão que lideraram o número de instalação de painéis fotovoltaicos no ano de 2015, ganhando espaço. No ano de 2014, o mercado de energia chinês apresentou um acréscimo de aproximadamente 10,6 GWp de capacidade instalada e no ano de 2015 o crescimento foi de 15,2 GWp atingindo 43,5 GWp de potência instalada. O aumento da taxa de crescimento mostra a evolução e domínio chinês no mercado de energia solar. [11]

A Índia também merece destaque já que no ano de 2015 foram instalados cerca de 2 GWp de capacidade de energia FV (aumento de 66% de capacidade instalada no país) indicando que ela deverá ser um dos principais lugares de expansão dessa fonte no mundo já que apresenta alto potencial solar e alta crescente na demanda. Outros países asiáticos que merecem ser destacados pelas consideráveis taxas de crescimento são Coreia (1 GWp), Taiwan (400 MWp) e Paquistão (600 MWp). [11]

Os fatores responsáveis por proporcionar esse crescimento são a redução no custo dos módulos e das placas fotovoltaicas e também o aumento da eficiência dos painéis. A

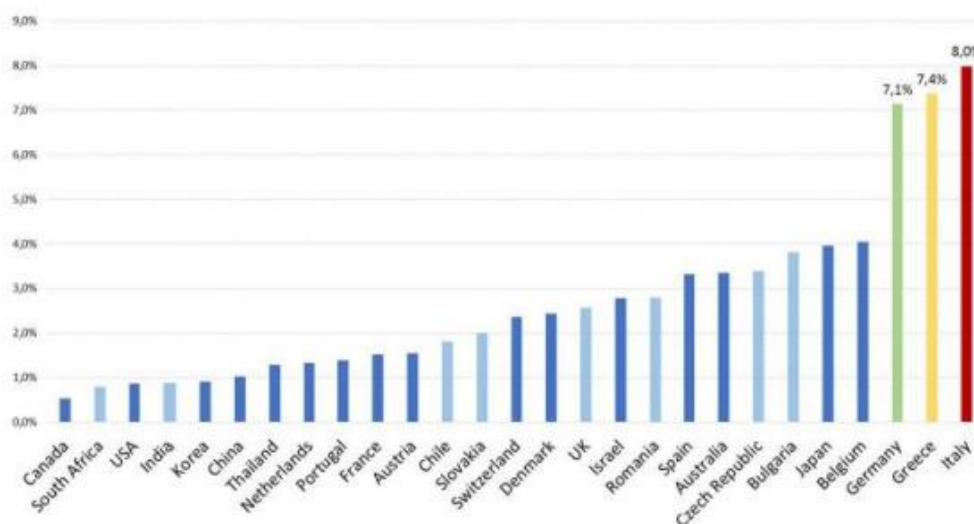
redução do custo acontece principalmente pelo aumento de fabricantes desse tipo de tecnologia proporcionando produção em maior escala e consequentemente baixos custos, como acontece na China.

O mercado europeu sofreu uma estagnação no crescimento nos últimos anos. No ano de 2015 apresentou um crescimento causado principalmente pelo Reino Unido que acrescentou 3,5 GWp a sua matriz energética. A Alemanha que liderava em capacidade instalada apresentou redução no crescimento, saindo de 3,3 GW no ano de 2013 para 1,9 GWp em 2014 e 1,5 GWp em 2015. [11] Espanha e Itália tradicionalmente conhecidos como grandes produtores de energia solar também apresentaram quedas na instalação de painéis fotovoltaicos, apresentando respectivamente, 300MWp e 56MWp de crescimento.

O Estados Unidos continua liderando em capacidade instalada na América do Norte e apresentou expressivo crescimento no ano de 2015, 7,3 GWp se comparado aos dois anos anteriores, 6,2 GWp no ano de 2014 e 4,7 em 2013. O Chile é o país a ser destacado na América do Sul, com um acréscimo em sua capacidade instalada de 450 MWp.

A participação da energia solar na matriz energética do país é apresentada no gráfico da figura 8. Pode se destacar que os países com maior penetração da participação da energia solar na demanda são Itália, Grécia e Alemanha, deixando de fora China e Estados Unidos que apesar de serem líderes em capacidade instalada, a energia solar não tem representatividade frente a demanda total do país por energia elétrica.

Figura 8: Participação da Energia Solar na matriz dos países.



Fonte: Adaptado de [4]

De modo geral o que colaborou com o desenvolvimento da energia solar nesses países destacados foram as políticas de incentivo a essa tecnologia, de forma a aumentar a fabricação ou facilitar a importação dos equipamentos, programas de financiamento

diferenciados para compra dos painéis e modelos regulatórios de comercialização da energia elétrica.

2.4 Oferta da Geração fotovoltaica no Brasil

Mesmo apresentando a matriz energética predominantemente renovável, quando se diz respeito a energia solar, o Brasil não aproveita as condições naturais favoráveis da sua região geográfica. Segundo o Ministério de Minas e Energia, no final do ano de 2016, o Brasil possuía 81 MW de energia solar fotovoltaica instalada, sendo 24 MW de geração centralizada e 57 MW de geração distribuída. Esses números não colocam o Brasil entre os 20 países líderes de produção de energia fotovoltaica, já que todos possuem mais de 1 GW de capacidade instalada. [12]

O Brasil apresenta elementos naturais que contribuem para o desenvolvimento da Energia Solar no país, como por exemplo, os altos níveis de insolação no território brasileiro pelo fato de estar localizado próximo a linha do equador e também grandes reservas de quartzo de qualidade, proporcionando vantagem competitiva na produção de silício com alto grau de pureza usado na fabricação de células e módulos solares.

A média anual de irradiação no Brasil é relativamente alta e apresenta uniformidade, conforme mostrado na figura 9. Se comparada aos dos países europeus, a média de irradiação em qualquer local do território brasileiro, que está numa faixa de 1500 Wh/m² à 2500 Wh/m², é superior aos países europeus que possuem projetos de aproveitamento solares bem consolidados como por exemplo Alemanha (900 Wh/m² -1250 Wh/m²), França (900 Wh/m² - 1650 Wh/m²) e Espanha (1200-1850 Wh/m²). [13]

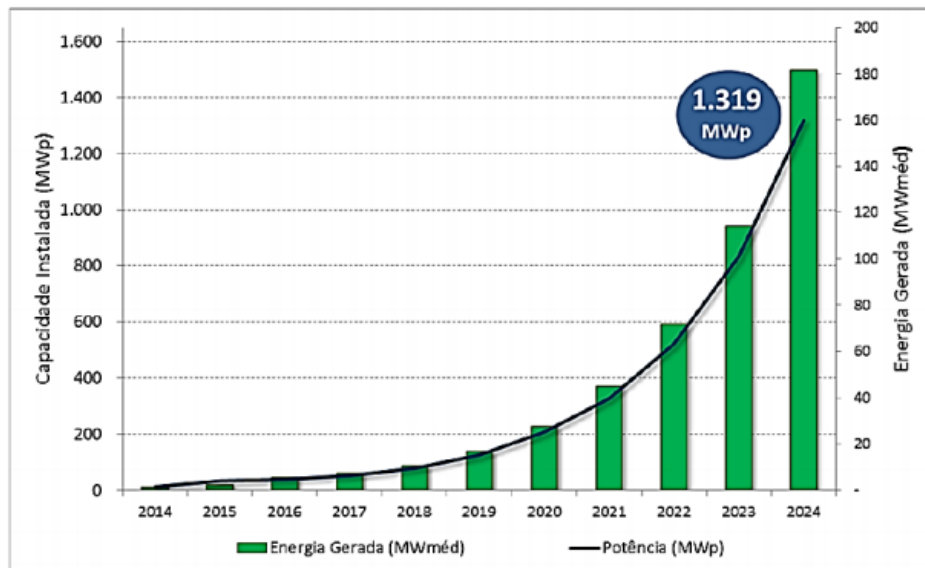
Acompanhando a tendência mundial do crescimento da tecnologia solar, o Brasil também deverá apresentar crescimento na capacidade instalada como apresentado no gráfico da figura 10. O crescimento deve ser consequência dos incentivos governamentais já existentes que devem impulsionar o cenário. Recentemente a energia solar no Brasil era usada apenas em sistemas isolados onde a rede elétrica não alcançava, mas recentemente a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) através da resolução número 482 de 2012 [14] permitiu o avanço de instalações de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, possibilitando o acesso dos micro e mini sistemas fotovoltaicos a rede elétrica. Como somente em 2012 aconteceu a regulamentação e normalização para o setor fotovoltaico, além de ser pouco representativa, a energia solar ainda não desenvolveu a indústria e mercado nacional para esse tipo de tecnologia.

Figura 9: Média anual Irradiação solar Diária plano inclinado.



Fonte: [26]

Figura 10: Tendência do crescimento da capacidade instalada e energia solar gerada.



Fonte: [43]

A geração fotovoltaica centralizada apresenta um desafio que é característico de sistemas de geração de energia intermitentes: manter o equilíbrio entre a oferta e demanda.

A geração distribuída possibilita que os efeitos das variações instantâneas causadas pelo sombreamento, por exemplo, não tenham grande impacto na oferta de energia elétrica. O Ministério de Minas e Energia nacional apresentou no ano de 2015 o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD) que deve incentivar e aumentar a participação das fontes renováveis através de créditos a geração distribuída.

Capítulo 3

3. A Energia Fotovoltaica

Apesar da descoberta do efeito fotovoltaico no século XIX somente no final do século XX foi que ocorreu o desenvolvimento dessa tecnologia proporcionando seu uso comercial. Sendo um dos caminhos a diversificação da matriz energética mundial através de fontes renováveis, a instalação dos sistemas fotovoltaicos começou a crescer na Europa e hoje são utilizados no mundo todo em diferentes graus de desenvolvimento. Será detalhado nesse capítulo informações sobre os módulos fotovoltaicos assim como informações técnicas dos sistemas fotovoltaicos.

3.1 História

O francês Alexandre Edmond Bequerel em 1839 foi o primeiro cientista a relatar uma diferença potencial em uma estrutura semicondutora quando essa era exposta a luz. Esse fenômeno ficou conhecido como efeito fotovoltaico, responsável pela conversão da energia da luz em energia elétrica. Após a descoberta do efeito fotovoltaico, somente em 1883 foi fabricada por Charles Fritts uma célula fotovoltaica que apresentava menos de 1% de eficiência, mas que provava a possibilidade de se produzir eletricidade a partir da luz solar. Já no século XIX surgiram grandes nomes como Michael Faraday, James Clerk Maxwell e Nikola Tesla, que desenvolveram teorias sobre a indução eletromagnética, força elétrica e ondas eletromagnéticas, criando uma base teórica para explicar o efeito fotoelétrico e consequentemente seu desenvolvimento. [15]

A partir do desenvolvimento teórico da eletricidade e da criação de um método para obtenção do silício mono cristalino por Jan Czochralski, foi criada em 1953 pelos pesquisadores a primeira célula fotovoltaica moderna. O grande diferencial apresentado por esse grupo de pesquisadores foi a introdução de impurezas no silício, processo esse conhecido como dopagem. Foram fabricadas duas células de silício dopadas com elementos opostos e empregado uma união difusa p-n entre elas, de forma que ao incidir luz sobre a junção ocorre a geração de corrente elétrica a partir da movimentação dos elétrons. O processo ainda apresentava baixa taxa de conversão, cerca de 6%, necessitando de mais desenvolvimento tecnológico e pesquisas, pois, era inviável a produção em escala comercial de uma tecnologia que apresentava baixa eficiência e também alto custos de produção. Esse tipo de tecnologia era restrito às aplicações onde o custo não eram o fator limitante, como satélites, boias de navegação e equipamentos de comunicação em locais remotos. [15]

Devido à crise do petróleo na década de 1970 o preço do petróleo foi quadruplicado pela crise energética mundial. Na mesma década os países se voltaram a uma outra questão,

a preocupação com os impactos ambientais e conseqüentemente com as mudanças climáticas. As potências mundiais iniciaram um forte investimento em pesquisas de outras fontes de geração de energia, incluindo a energia fotovoltaica. Estima-se que o custo da eletricidade proveniente desta fonte foi de 80 U\$/Wp para 12 U\$/Wp em uma década (valor com referência na cotação do dólar da década de 1970). [15]

Resultado das preocupações com a falta de energia elétrica e de catástrofes climáticas, foi criado em 1982 o primeiro grande parque de geração fotovoltaica nos Estados Unidos, e no começo da década de 1990, os primeiros telhados com instalações dessa tecnologia na Alemanha e no Japão. Já era nítido que o desenvolvimento da tecnologia estava consolidado e que a redução nos custos de instalação dependia apenas do aumento da produção e das melhorias nas técnicas de fabricação dos módulos fotovoltaicos.

A conversão da energia solar em energia elétrica pelos painéis fotovoltaicos acontece diretamente e, portanto, a geração elétrica é totalmente relacionada à radiação solar instantânea. A grande variabilidade de geração que o sistema solar pode apresentar em sua operação é um grande desafio para manter o equilíbrio entre oferta e demanda do sistema já que é uma fonte intermitente.

A geração solar limitada ao período diurno (às horas de sol) apresenta boa sincronia com a curva de demanda, principalmente com as curvas de demanda de regiões comerciais e industriais, contribuindo para oferta nos picos de demanda. Por outro lado, quando não ocorre a geração, período noturno, é necessário acionar outras fontes para suprir a demanda. O aumento da frequência de acionamento e desligamento de outras usinas representam desgastes maiores nelas, conseqüentemente, menor eficiência e aumento de custos de operações. [16]

A instalação e manutenção de uma usina fotovoltaica centralizada, assim como a distribuída, é consideravelmente simples. A manutenção do sistema consiste, principalmente, na limpeza dos módulos fotovoltaicos e as despesas anuais com a operação da usina é de aproximadamente 1% do valor do investimento inicial. Os módulos têm uma vida útil estimada em 25 anos e após esse período de funcionamento a produção do módulo é reduzida em aproximadamente 20% [17]. A queda de rendimento dos painéis é consequência da degradação natural das células fotovoltaicas. Os inversores apresentam vida útil de 5 a 10 anos, necessitando da troca durante o período de operação da usina. [18]

O módulo é caracterizado por sua potência elétrica de pico (Wp), que corresponde ao valor de potência obtido na condição padrão de ensaio (STC, em inglês *Standard Test*

Conditions). A potência caracterizada em W_p é a potência máxima que um painel pode gerar em condições ideais de operação.

3.3 Módulos Fotovoltaicos

Um módulo fotovoltaico é a combinação de várias células fotovoltaicas normalmente conectadas em série. Uma célula nesse contexto representa a menor estrutura na cadeia e é constituída por uma lâmina de semicondutor dopado que conseqüentemente formam camadas do tipo P e N com junção paralela à superfície. Os materiais cristalinos são os mais utilizados para produção de células, sendo que os cristalinos o mais utilizado para esse tipo de aplicação é o Silício.

O rendimento das células é limitado por alguns fatores como: fótons com energia não aproveitável, reflexão da superfície e ineficiência na absorção dos fótons. [19]. As tecnologias de fabricação e rendimento dos materiais são melhor descritos a seguir:

- Células de Silício Monocristalino: Atualmente é a tecnologia mais utilizada em escala comercial. As vantagens desse material é que representa o segundo minério mais abundante na superfície terrestre. Células fabricadas com esse material tem baixo impacto ambiental e apresentam elevada vida útil. A eficiência de uma célula comercial desse tipo já atinge uma eficiência próxima à 16%. A principal desvantagem dessa tecnologia é o alto custo de construção. O processo de fabricação consiste em finas camadas de silício puro (*wafers*) que passam por um tratamento químico para receber impurezas formando duas camadas de silício P e N. Para finalizar o processo, é colocado em uma face a película metálica e na outra uma grade metálica, adicionando posteriormente material antirreflexivo do lado que recebera a incidência solar. [20]
- Células de Silício Policristalino: Possui menor eficiência se comparada com a célula de silício monocristalino, porém o custo de fabricação é mais baixo. O material do lingote utilizado para produção é formado pela fundição de aglomerados de pequenos cristais de tamanhos e orientações diferentes. As células são montadas em módulos para ganhar resistência mecânica, possuindo eficiência na faixa de 13 a 15%. [20]
- Filmes Finos: Tecnologia que surgiu recentemente se comparado aos módulos cristalinos, são produzidos a partir da sobreposição de finas camadas de materiais em uma base rígida ou flexível (vidros e metais). Os materiais mais utilizados são silício amorfo e silício microcristalino. Os filmes finos devem apresentar menores custos no mercado já que seu processo de produção consome menos energia e há menos desperdício de material devido ao método utilizado para deposição dos filmes, como por exemplo o processo de evaporação. Apesar de apresentar melhor aproveitamento para baixos níveis de radiação e ser menos sensível as altas temperaturas, essa

tecnologia apresentam menor eficiência se comparada as apresentadas anteriormente.

3.4 Componentes principais dos sistemas fotovoltaicos

Serão apresentados dois tipos de sistemas fotovoltaicos, os sistemas fotovoltaicos autônomos e os sistemas fotovoltaicos integrados à rede elétrica. O sistema híbrido é um sistema ligado diretamente à rede, e por isso o será dado mais ênfase.

3.4.1 Sistemas Fotovoltaicos Autônomos

Esse tipo de sistema é comumente encontrado em regiões isoladas não abrangidas pela rede de distribuição de energia. Os SFA (Sistemas Fotovoltaicos Autônomos) estão presentes em instalações de zonas rurais, em ilhas, em praias e também em instalações urbanas para iluminação pública, sinalização de estradas e rodovias e sistemas de telecomunicação. Representam uma boa opção para substituir os geradores a diesel já que reduzem problemas ambientais. [22]

O SFA precisa ser bem dimensionado, ou seja, ter a quantidade ideal de módulos e baterias conforme a disposição de radiação solar local para atender a demanda de potência do sistema, já que nesse tipo de sistema a fonte primária de energia elétrica é apenas a gerada pelos painéis fotovoltaicos. O dimensionamento correto representa um sistema confiável onde há baixa probabilidade de perda de carga (*loss-of-load probability* em inglês). [21]

Deve ser destacado também a importância para as comunidades isoladas ao serem instalados esse tipo de sistema já que representam uma melhoria social e econômica, onde o acesso aos serviços de educação e saúde, por exemplo, são facilitados pelo uso da energia elétrica. Em termos de custos, em alguns casos, há a vantagem econômica em se utilizar desse tipo de tecnologia a instalar linhas de distribuição e transmissão até o local. [21]

Os componentes principais de um sistema autônomo são: placas fotovoltaicas, baterias, controladores de carga e inversores de tensão. As baterias são usadas em casos que haja a necessidade de geração contínua de energia elétrica criando, até certo ponto, independência do sistema a disponibilidade da radiação solar que é intermitente e aleatória ao longo do tempo. Em casos de dias chuvosos e nublados em que não há luz solar a bateria proporciona autonomia ao sistema e nos dias muito ensolarados ela diminui o desperdício se a geração ultrapassar a demanda do sistema. Ela pode contribuir também para se estabilizar a tensão de saída do sistema que é variável, de modo a diminuir os prejuízos causados por essa variação. [22]

Os controladores de cargas que são colocados entre os painéis e as baterias são importantes para controlar a tensão de entrada nas baterias, evitando sobrecargas ou descargas excessivas e conseqüentemente aumentando a vida útil delas. Já os inversores CC-CA normalmente usados são instalados para atender os aparelhos domésticos, por exemplo, que funcionam em corrente alternada enquanto a geração do sistema é em corrente contínua.

3.4.2 Sistemas Fotovoltaicos Integrados à Rede Elétrica

Diferentemente dos sistemas autônomos, os sistemas integrados são instalados em locais onde já existem as redes elétrica operando em paralelo a elas. Dos sistemas integrados há dois tipos, os distribuídos e os centralizados. Os distribuídos são considerados os sistemas pequenos, instalados em residências por exemplo, que complementados pela rede elétrica atendem à demanda do local instalado. Já os centralizados são os de maior porte, ou seja, possuem mais placas solares e conseqüentemente geram mais energia elétrica funcionando igualmente a usinas de geração. Os sistemas elétricos centralizados normalmente são instalados em lugares distantes dos pontos de consumo necessitando apenas de áreas grandes para instalação. [21]

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados de acordo com a capacidade de geração. Segundo a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) [24] as classificações são:

- Microgeração distribuída: Potência instalada menor ou igual a 75 kW
- Minigeração distribuída: Potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW e que utilize cogeração qualificada.
- Usinas de Eletricidade: Potência instalada superior a 5 MW

Os sistemas distribuídos se enquadram na classificação de micro e mini geração, e os sistemas centralizados correspondem as usinas de eletricidade. A micro geração é comumente aplicada em instalações de módulos solares nos telhados de residências, atendendo a demanda local e o excedente da potência injetada na rede é transformada em créditos pelas companhias de distribuição.

A mini geração possui mais aplicação comercial e industrial, suprimindo totalmente ou parcialmente, a demanda elétrica desses tipos de consumidores, reduzindo a dependência de potência fornecida pela rede elétrica. Pode representar também maior confiabilidade no fornecimento de energia elétrica e redução nos custos a longo prazo, além de melhorar a imagem da empresa com os clientes perante o papel de responsabilidade ambiental. [21]

As usinas fotovoltaicas são sistemas conectados à rede elétrica através dos transformadores e das linhas de transmissão injetando potência para suprir a demanda da

rede, assim como as usinas hidrelétricas e termoelétricas. Nesse tipo de instalação as placas solares são conectadas a inversores centrais que estão conectados a cabines de transformação elevando a tensão até o nível das tensões das linhas de transmissão da rede elétrica.

Os sistemas fotovoltaicos de modo geral apresentam os seguintes componentes: painéis solares, inversores para a conexão à rede elétrica, caixas de *strings*, quadro de proteção de corrente contínua e de corrente alternada e acessórios. Os painéis fotovoltaicos nesse tipo de sistema possuem a mesma tecnologia dos autônomos, o que difere é a quantidade de células em série em cada painel, normalmente são 60 células, que resultam numa potência de pico de 240 Wp e 250 Wp. [21]

O inversor tem a função de fazer a ligação entre o arranjo fotovoltaico com a rede elétrica. Para isso ele converte a energia gerada na forma CC pelos geradores (painéis) para a forma padrão CA da rede. O fator de dimensionamento dos inversores (FDI) é a razão entre a capacidade do inversor e potência nominal do gerador. Para dimensionar o inversor, deve-se considerar o clima da região em que está sendo feita a instalação, pois, em locais com maior incidência solar ocorre maior geração e conseqüentemente, maior trabalho do equipamento. Mas é comum também subdimensionar o inversor, já que, ele não deve operar no máximo da potência nominal do gerador fotovoltaico que ocorre em poucos momentos durante o tempo de operação. Para sistemas de mini geração são comumente usados inversores centrais que são alimentados por vários painéis fotovoltaicos. [21]

No que se diz respeito à proteção do sistema, as caixas de *strings* conectam as *strings* de um arranjo fotovoltaico no inversor, protegendo-o de distúrbios elétricos que podem ocorrer entre eles. As *String Box* conectam os cabos dos módulos solares em dois barramentos, o barramento positivo e o negativo, que vão ser conectados no inversor. Os dois barramentos devem ser bem separados e identificados dentro da caixa, que deve conter também fusíveis para proteção. [21]

O quadro de proteção de corrente contínua possui os mesmos elementos da caixa de *string* e pode assumir a função dela, o que a diferencia são os dispositivos de proteção adicionais: chave de desconexão CC e dispositivo de proteção de surto (DPS). As chaves de desconexão funcionam para desconectar os módulos do resto do sistema, sendo essencial para a manutenção das instalações. Deve suportar os níveis de tensão dos respectivos sistemas em que estão instaladas e conseguir interromper um arco elétrico CC. O DPS protege o sistema de sobretensões ocasionadas de descargas atmosféricas. [21]

O quadro de proteção de corrente alternada é o ponto da conexão entre o sistema fotovoltaico e à rede elétrica. Os componentes principais desse quadro são o disjuntor diferencial residual (DDR), que também podem ser uma combinação entre um disjuntor magnético com um interruptor diferencial residual (IDR) e um DPS trifásico. [21]

Os acessórios auxiliam a operação do sistema fotovoltaico conectado à rede de forma a contribuir para o seu monitoramento. É comum a instalação de medidores das condições climáticas do local, normalmente é usado uma central meteorológica para medição de velocidade do vento e temperatura por exemplo, que podem ter influência na operação do sistema. O medidor de energia é também essencial para o sistema para se monitorar o quanto o indivíduo está gerando e consumindo de energia elétrica. Para isso é usado um medidor do tipo bidirecional, registrando o fluxo de potência da concessionária até o consumidor e o fluxo de potência injetado na rede.

Capítulo 4

Como já discutido anteriormente no capítulo 2, a matriz de energia elétrica brasileira é predominantemente hidráulica. A presença de hidrelétricas em território nacional é favorável à instalação de sistemas fotovoltaicos operando em conjunto a elas constituindo sistemas híbridos hidrelétricos e fotovoltaicos. É importante destacar a relação de complementariedade entre essas duas fontes que fazem desses sistemas, vantajosos. Quando a hidrelétrica possui reservatório é possível ainda utilizar se de uma tecnologia em desenvolvimento que tornaria o sistema ainda mais vantajoso, os arranjos flutuantes. Nesse capítulo será descrito o funcionamento dos sistemas híbridos e também será apresentadas informações referentes as fontes hidrelétricas e fotovoltaicas, incluindo os sistemas com arranjos de painéis solares flutuantes.

4.1 Sistemas Híbridos Hidrelétricos Fotovoltaicos

Um sistema híbrido hidrelétrico fotovoltaico é um sistema que tem como fonte de geração dois aproveitamentos, o aproveitamento hidrelétrico e o aproveitamento solar, operam em conjunto, porém, nem sempre em paralelo para atender uma demanda de cargas consumidoras. Os sistemas das hidrelétricas, normalmente, são construídos e controlados para fornecer corrente em corrente alternada (CA) enquanto que os sistemas fotovoltaicos funcionam para gerar energia em corrente contínua (CC). A conversão de corrente ca/cc é possível com o uso de retificadores assim como a conversão de cc/ca é possível utilizando conversores cc/ca comumente utilizados em residências com sistemas fotovoltaicos. [20]

A combinação entre a geração hidráulica e solar aumenta a flexibilidade e confiabilidade do sistema elétrico pela relação de complementariedade entre elas. Se de um lado a energia fotovoltaica apresenta dificuldade de estabilização do sistema pela variação dos picos de geração, a energia hidráulica apresenta a estabilidade através das características operacionais das turbinas. As usinas hidrelétricas possuem vantagens operacionais como partida e parada rápida que permitem elas operarem como compensadores síncronos dando grande flexibilidade na curva de geração. Assim, pode-se administrar um sistema híbrido de forma a armazenar a água no reservatório e estabilizar a curva de geração fotovoltaica. A operação em conjunto dessas duas fontes pode compartilhar uma mesma estrutura de ligação na rede e atender uma demanda de carga desde que tenham potências similares entre seus componentes.

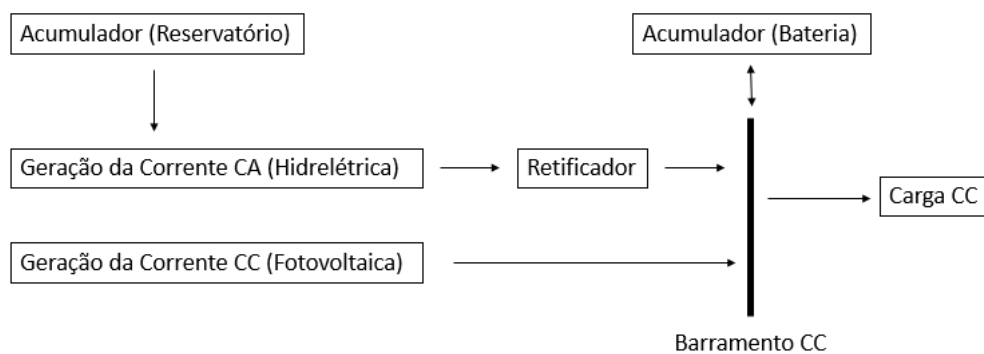
Uma visão geral da constituição de um sistema híbrido hidrelétrico fotovoltaico pode ser feita da seguinte forma: dois geradores, hidrelétrico e outro fotovoltaico, sistema de ligação (cabearamento), dispositivos de acumulação de energia e carga. Já para o funcionamento deve

se pensar em um sistema de proteção e outro de controle gerenciando o funcionamento entre os dois geradores e a demanda das cargas.

Os dispositivos acumuladores devem ter papel fundamental na estratégia de operação do sistema. Para esse tipo de sistema esses acumuladores são representados pelos reservatórios de água e baterias, que devem ser acionados conforme disponibilidade das fontes trabalhando em complementariedade entre solar e hidrelétrica.

O esquemático da figura 11 representa o esquemático mais simples de um sistema híbrido hidrelétrico que pode ser construído. Consiste em um barramento CC alimentado diretamente pela geração fotovoltaica e por um retificador da potência gerada pela hidrelétrica. O sistema deve alimentar exclusivamente uma carga CC.

Figura 11: Esquemático sistema Híbrido de uma barra CC

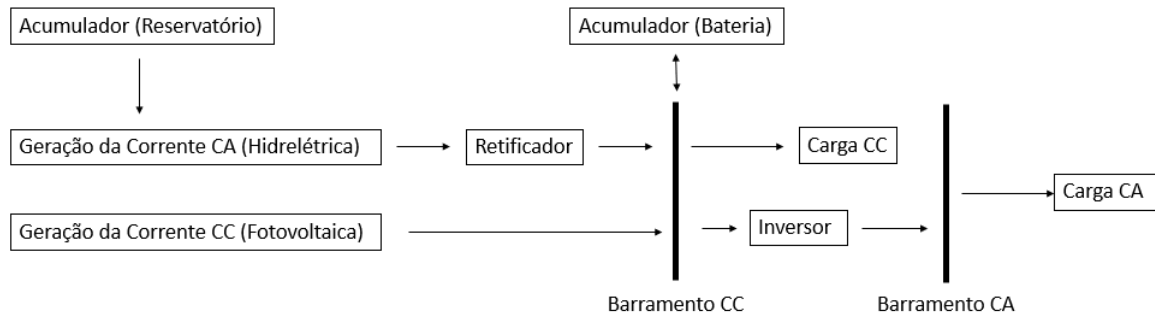


Fonte: Adaptado de [20]

O esquemático da figura 12 consiste em um sistema com um barramento de CA instalado paralelamente ao barramento de CC. É necessário atenção ao fato de que deve ocorrer a sincronização das tensões alternadas dos dois tipos de fonte do sistema, já que uma parte é gerada por uma máquina elétrica e a outra por um dispositivo de estado sólido. Instalando um controlador eletrônico, os geradores e a bateria podem ser ligados e desligados do circuito de acordo com o estado de carga e operação do sistema. O controlador também tem o papel de definir a corrente a ser gerada pelo gerador hidrelétrico. [20]

Os dois sistemas apresentados possuem limitação na potência a ser fornecida ao sistema pois são provenientes de um barramento CC que não consegue atingir níveis de alta tensão. Para atender uma demanda de 1 a 2 kW, um barramento CC em 24 V deve fornecer correntes numa faixa de 40 a 80 A. Para atender potências maiores seria necessário investir em um banco de baterias de dimensões bem maiores conseguindo então fornecer uma tensão de 127 V, sendo de difícil viabilidade econômica. [20]

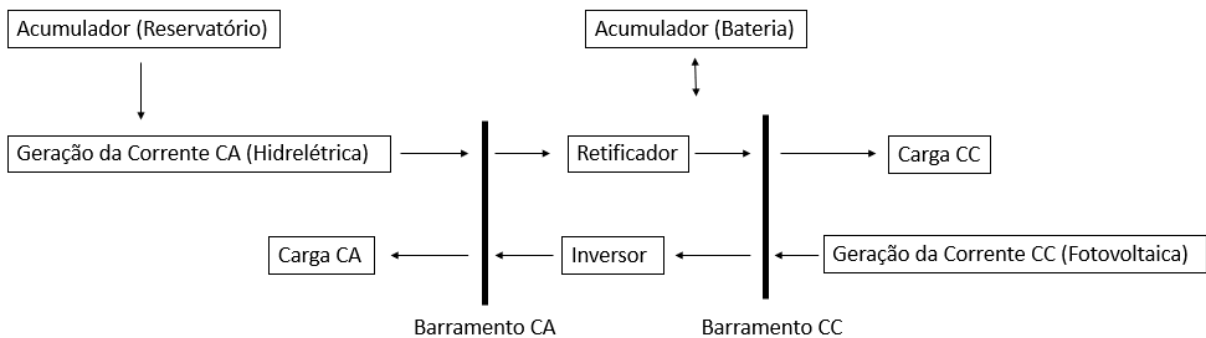
Figura 12: Esquemático (a) sistema Híbrido de duas barras.



Fonte: Adaptado de [20]

Para sistemas de maiores demandas, a estrutura apresentada na figura 13 aparece como uma possível solução, já que o gerador CA opera em paralelo com um inversor do gerador CC e consegue operar para atender maiores tensões. A frequência do barramento CA pode ser definida pela saída do gerador hidrelétrico e então a saída do inversor poderá ser igual à do barramento, principalmente se for um gerador síncrono. Esse tipo de sistema não tem limitação na potência fornecida e consegue atender cargas CA e CC.

Figura 13: Desenho Esquemático de um sistema Híbrido de duas barras.



Fonte: Adaptado de [20]

Aproveitando as condições naturais do Brasil favorável a geração fotovoltaica e as usinas hidrelétricas já instaladas no país, a proposta de um sistema híbrido a partir dessas duas fontes seria feita colocando usinas solares para operar em paralelo as grandes usinas hidrelétricas já existentes. A instalação das usinas fotovoltaicas seria feita sobre áreas próximas aos geradores hidrelétricos, inclusive a área do reservatório, de forma a aproveitar da melhor forma a estrutura já usadas pelas usinas hidrelétricas e também das subestações e linhas de transmissões.

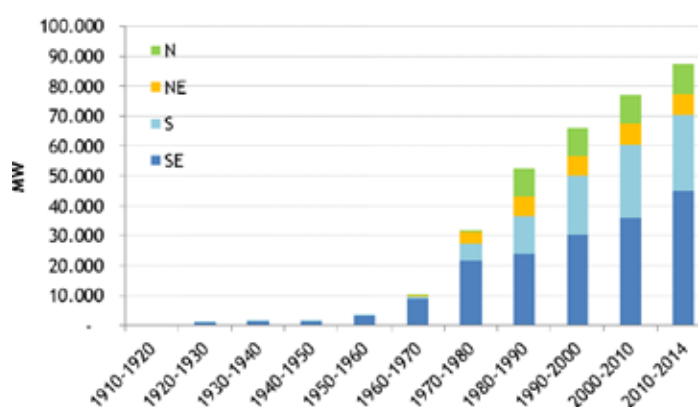
4.2 Hidrelétricas

O Brasil apresenta grande potencial hidrelétrico devido ao grande potencial hídrico no território nacional e a topografia favorável. É uma alternativa mais segura para expansão da oferta elétrica se comparada as fontes intermitentes, pois, é possível planejar e controlar a geração através dos níveis dos reservatórios. A expansão desse tipo de usina se restringe as áreas com potencial hidrelétrico, que necessita de um relevo favorável e no caso de usinas com reservatórios, grandes áreas para inundação.

As hidrelétricas com reservatórios ao represar a água armazenam também energia proporcionando a administração dos recursos de outras fontes conforme disponibilidade dos mesmos. Essa característica torna essa fonte de alta confiabilidade e também uma ótima opção para operar em conjunto com sistemas de fontes intermitentes, como a solar e eólica. Além da geração de energia, os reservatórios possuem outras funcionalidades como controle de cheias, irrigação, fornecimento de água para abastecimento humano e recreação.

No final do século XIX iniciou se a exploração das hidrelétricas no Brasil. A primeira usina instalada foi a Usina hidrelétrica Marmelos Zero construída as margens do rio Paraibuna (MG) com 250 kW de potência instalada. A expansão de instalações iniciou se pelas regiões Sul e Sudeste, regiões mais desenvolvidas e conseqüentemente de maior consumo. Com o desenvolvimento da tecnologia de geração e transmissão, as instalações começaram aparecer em outras regiões e serem interligadas. [26] O gráfico da figura 14 apresenta o crescimento da potência instalada de hidrelétricas dividido por regiões.

Figura 14: Evolução das Usinas Hidrelétricas por região no Brasil.



Fonte: [44]

Responsável por aproximadamente 60% da geração elétrica no país, a geração hidráulica de energia representa a principal fonte de eletricidade brasileira e possui potencial para crescer. Nos últimos anos a geração hidrelétrica vem enfrentando dificuldades devido à

restrição hídrica e apesar de aumentar a potência instalada, ocorreu a diminuição da parcela porcentual na matriz de energia elétrica. A queda no fator de capacidade das usinas (razão da geração média e capacidade máxima de geração) apresentados na figura 15 representa as condições climáticas desfavoráveis.

A queda no fator de capacidade também pode ser atribuída a expansão das usinas hidrelétricas à fio d'água com pequenos reservatórios. A geração desse tipo de usina é próxima a vazão afluente e ao aumentar esse tipo de instalação a capacidade de reserva do SIN (Sistema Interligado Nacional) é reduzida.

Figura 15: Histórico do fator de Capacidade das Hidrelétricas Brasileiras.



Fonte: [44]

Os dois parâmetros principais que determinam o potencial de uma hidrelétrica são o desnível do terreno e vazão de água disponível. Os elementos construtivos são basicamente: a barragem, sistema de captação e adução de água, casa de força e vertedouros.

A expansão das usinas hidrelétricas enfrenta grande dificuldade pela necessidade de se estudar os aspectos técnicos e ambientais da região a ser instalada, o que torna o processo de decisão e licenciamento demorado. No Brasil, por exemplo, existe grande potencial hidrelétrico na região da Amazônia, porém, seu uso é limitado pelo fato de se tratar de uma região de preservação ambiental e de terras indígenas. O tempo de construção para esse tipo de investimento também é maior, aumentando o tempo de retorno econômico aos investidores. Devido as dificuldades por pressões ambientais e sociais para construção das hidrelétricas, estima se que o crescimento desse aproveitamento esteja relacionado principalmente as PCHs (Pequenas Centrais Hidrelétricas).

O SIN proporciona uma vantagem aos sistemas hidrelétricos no Brasil. A geração de uma usina não precisa ser necessariamente a demanda local, sendo possível contribuir com

a oferta energética para outras regiões do país. Esse fator é importante, pois, é aproveitado a complementariedade hidrológica natural do regime hídrico brasileiro, que é bem definido entre o Sudeste e as demais regiões, pois quando ocorre a restrição hídrica numa região outra usina é capaz de atender a demanda no local com baixa disponibilidade hídrica. A desvantagem de transmitir a energia de uma região para a outra é relacionado a perda que acontece nas linhas de transmissão de longas distâncias.

Os níveis dos reservatórios são afetados diretamente aos fatores relacionados ao balanço hídrico local. A evaporação do lago, dependendo da condição climática, é superior a pluviosidade e torna o balanço hídrico negativo, ou seja, os níveis dos reservatórios abaixam devido a evaporação. Esse fator está relacionado principalmente a profundidade do reservatório, ventos, variação da temperatura e umidade do ar. A quantidade de água perdida por evaporação é linearmente proporcional a perda energética dessas usinas. Segundo uma pesquisa realizada pela ONS a maioria dos reservatórios apresentam perda anual de até 500 mm. A hidrelétrica de Sobradinho apresentou uma perda líquida anual de 1946 mm no estudo. [27]

4.3 Sistemas Fotovoltaicos

A proposta para os sistemas fotovoltaicos em um sistema híbrido hidrelétrico/fotovoltaico seria de instalar sua estrutura em terras à margem do reservatório, na estrutura da barreira da hidrelétrica ou a instalação de estruturas flutuantes sob o reservatório.

Algumas características gerais dos sistemas fotovoltaicos já foram apresentadas no capítulo 3, então o objetivo dessa sessão é detalhar mais tecnicamente alguns pontos importantes desse tipo de estrutura.

Para a instalação de um sistema fotovoltaico conectado à rede existem algumas orientações e instruções básicas que devem ser analisadas e consideradas. Em relação ao local, deve se buscar um local onde a radiação solar existe no maior período do dia e seja livre de sombras, nesse caso proveniente principalmente de árvores. No hemisfério Sul procurar instalar as placas voltadas a direção norte com a inclinação da latitude local. Para sistemas que apresentam capacidade de reservar energia através de baterias pode se variar a inclinação aumentando o ângulo de inclinação em 10° para conseguir melhor aproveitamento nos meses com menor incidência solar. [28]

- Suporte dos módulos: Procurando sempre facilitar a instalação e manutenção do sistema, deve ser instalado o mais próximo ao ponto de conexão diminuindo a extensão de cabeamento até o inversor. Outras exigências para os suportes são necessárias conforme citadas por [29]:

- Resistir a ventos de até 150 km/h;
- Ser posicionado de forma a garantir uma altura mínima dos módulos de um metro;
- Fabricados com materiais não corrosivos, ferro galvanizado e alumínio, por exemplo;
- O suporte deve ser aterrado eletricamente de acordo com as normas vigentes, de forma a garantir que os painéis tenham contato com o aterramento.
- Cabeamento: Os cabos que vão ser utilizados para condução de corrente contínua deverão apresentar algumas características para maior segurança e confiabilidade do sistema:
 - Ser unipolares;
 - Possuir duplo isolamento;
 - Devem ser separados em polo positivo e negativo em eletrodutos diferentes; e
 - Caixas de passagem e conexão com vedação e isolamento garantido. Os isoladores devem suportar alta temperatura.

Para o dimensionamento dos cabos deve se lembrar da temperatura de operação dos painéis, que podem ultrapassar 50°C e então a condutividade dos cabos diminui e deve ser de apenas 40% em relação a fornecida para 30° C, conforme NBR 5410. [29]

O cabeamento do lado CA do sistema deve seguir a norma NBR 5410 [30] se for instalada a rede de baixa tensão.

- Proteção: O primeiro ponto de proteção do sistema deve ser um dispositivo para seccionar o circuito de alimentação CC antes de chegar no inversor, que deve ser acionado para manutenção e ajustes. Esse primeiro dispositivo pode ser um fusível de CC ou um disjuntor de CC. O primeiro é mais utilizado principalmente pelo custo.

A NBR 5410 classifica os riscos de contatos com as partes eletrizadas como risco direto, como contato com a parte metálica sob tensão, e risco indireto, como contato com partes não energizadas, mas que devido a falha de isolamento podem ficar energizadas. As medidas de segurança são classificadas como medidas ativas, quando ocorre o seccionamento do circuito quando o usuário está exposto a algum risco, e medidas passivas, limitam a corrente em um nível seguro.

- Conexão dos módulos fotovoltaicos:

Os módulos fotovoltaicos podem ser conectados em série ou em paralelo. Na conexão em série, o polo negativo de uma placa é conectado ao polo positivo da outra, conseqüentemente a corrente do conjunto é a mesma corrente do módulo, e a tensão do conjunto é a soma das tensões dos módulos. Na conexão em paralelo, os polos dos módulos são conectados entre os de mesma polaridade e então, a corrente do conjunto vai ser a soma das correntes dos módulos e a tensão do conjunto a mesma

do módulo. Sendo assim, a quantidade de arranjos em paralelo define a potência do sistema.

- Inversor:

Responsáveis por converter a energia de corrente contínua gerada pelos módulos fotovoltaicos em energia de corrente alternada usada pelos consumidores, os inversores proporcionam o sincronismo de tensão e frequência com a potência demandada da rede elétrica.

Os inversores podem ser divididos conforme papel na operação do sistema, como fontes de tensão ou fontes de corrente e também como comutados pela rede (garante o sincronismo com os parâmetros rede) ou auto comutados que independem dos parâmetros da rede. Essa classificação é chamada classificação pelo funcionamento do inversor [31]. As principais características desses inversores segundo [31] são:

- Fontes de corrente: Simplicidade, tolerância a qualidade da rede.
- Comutados pela rede: Simplicidade e robustez, elevada eficiência, Impossibilidade de funcionamento em ilha, harmônicos de corrente elevados, exigem compensação reativa e não recomendado para redes de baixa qualidade.
- Fontes de tensão: Tendência a melhorar a qualidade da rede, Flexibilidade para operação com baterias e mal funcionamento com rede defeituosa.
- Autocomutados: Tamanho relativamente pequeno, corrente com pouca distorção, fator de potência elevado (próximo a 1) e possibilidade de funcionamento em ilha.

4.3.2 Arranjos Solares Flutuantes

Os arranjos fotovoltaicos flutuantes apareceriam como uma opção para ser o gerador fotovoltaico do sistema híbrido. Esses arranjos se tratam de objetos de estudos que estão em desenvolvimento, não havendo definições finais sobre conceitos importantes de sua estrutura como formato, configuração e material.

A primeira usina solar flutuante foi instalada na região de Napa Valley nos Estados Unidos no ano de 2007. Com uma potência de aproximadamente 175 kW ela foi construída com o objetivo de abastecer a vinícola sem perder espaço de terra cultivável. [32]

As vantagens e desvantagens desse tipo de instalação depende do local onde será instalado e deve ser feito um balanço entre os pontos que serão apresentados para verificar

a viabilidade da instalação. As literaturas existentes que tratam desse tipo de estrutura apresentam algumas conclusões sobre a vantagem e desvantagem do seu uso como apresentado a seguir:

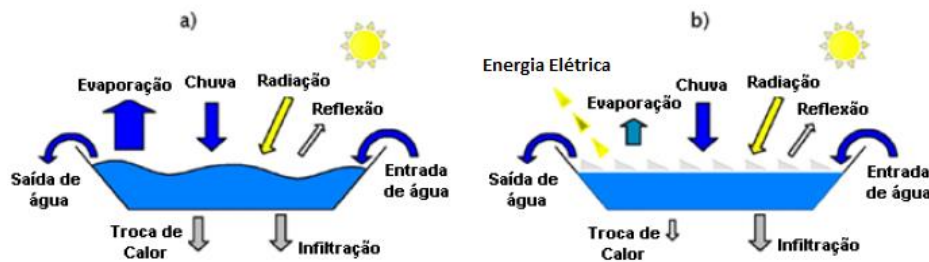
- Vantagens: A estrutura pode apresentar menor temperatura de operação devido ao contato com a água e portanto maior eficiência [34]; a taxa de evaporação do lago onde está instalado o sistema deve ser menor mantendo o nível de água mais estável; não há sombreamento na área e há estrutura da rede elétrica próxima disponível, como subestações e redes elétricas no caso de serem instaladas em reservatórios de hidrelétricas;
- Desvantagens: Dificuldade de acesso ao local para instalação e manutenção, intemperes da natureza (vento) podem afetar os parâmetros do sistema (ângulo e posição das placas), materiais resistentes a corrosão da água e impacto nas atividades como navegação e pesca.

A redução de crescimento de algas que em alguns casos levam à eutrofização do reservatório também seria um dos impactos positivos que esse tipo de usina proporcionaria se instalada no reservatório de uma hidrelétrica. Assim como a complementariedade inter-regional no Brasil, existe uma relação complementar entre a geração fotovoltaica e hidráulica. Os maiores períodos de baixo nível dos reservatórios correspondem ao período de seca com maior irradiação solar, e os períodos chuvosos normalmente correspondem aos de menor irradiação solar. [34]

As usinas fotovoltaicas flutuantes utilizam dos mesmos módulos disponíveis no mercado para geração nos sistemas instalados nos telhados e na terra, tornando o empreendimento competitivo. Observa-se a transição do uso dos painéis de silício monocristalino para os policristalino nas usinas já instaladas ao redor do mundo. [34]

Segundo as referências [35] e [36], os arranjos flutuantes desenvolvidos até agora tem o papel de melhorar o balanço água/energia nos reservatórios de irrigação, preservando a água para o uso na irrigação já que esse sempre foi um fator chave nos projetos existentes. Há reservatórios no Brasil que apresentam taxa de evaporação com o mesmo valor da vazão do rio e, portanto, deve-se analisar o quanto de impacto que uma instalação desse tipo pode causar no respectivo ambiente. Uma ilustração do balanço água/energia pode ser observado na figura 16:

Figura 16: Balanço entre água e energia. (a) o sistema sem painéis; (b) sistema com painéis instalados.



Fonte: Adaptado de [35]

A seguir será destacado alguns parâmetros dos painéis fotovoltaicos que devem ser considerados para construção do sistema segundo [35]:

- Posicionamento dos módulos. Procurar a inclinação e orientação dos painéis de modo a maximizar a conversão da radiação solar incidente no local;
- Distância da separação entre os painéis. Esse parâmetro deve ser calculado considerando a latitude do local de forma a reduzir às áreas sombreadas; e
- Deve ser planejado uma passarela na estrutura flutuante de no mínimo 0,5 m para ser usada para serviços de manutenção e operação dos painéis.

Algumas características operacionais e de projeto do reservatório também devem ser consideradas, como:

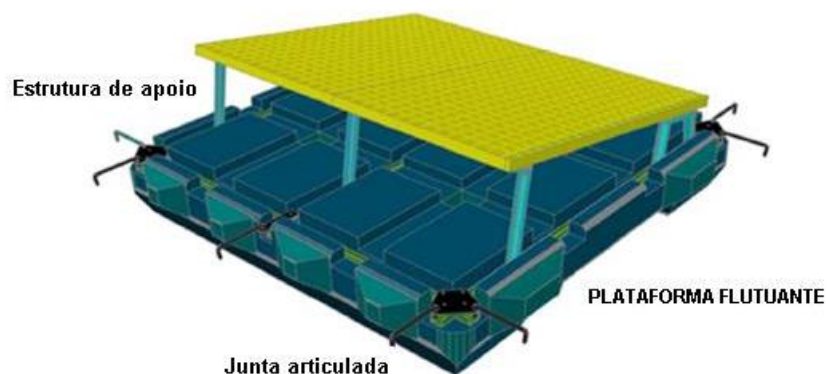
- Ação do vento no local. O vento influencia diretamente no ângulo de elevação dos painéis solares;
- Geometria do reservatório. Os formatos dos reservatórios são poligonais ou irregulares, sendo definido pela topografia do terreno que ocupam. O alinhamento e disposição dos painéis no formato área deve ser analisado para que seja alinhado com os pontos cardeais; e
- Características físicas das plataformas flutuantes. A geometria, o tipo e o material da plataforma devem oferecer ao sistema versatilidade dimensional e mecânica para que o sistema se adapte as diferentes condições dos reservatórios. O material mais utilizado na fabricação das peças é o plástico (polietileno de baixa densidade). Peças plásticas ocas são fabricadas para compor esse tipo de estrutura cumprindo os requisitos técnicos e custos acessíveis.

A estrutura do sistema é composta por alguns elementos principais destacados por [35] e [36]:

- A plataforma flutuante sob a qual é feita a instalação dos painéis solares, garantindo estabilidade e flutuabilidade do sistema;
- O suporte do painel fotovoltaico sob o qual é feita a instalação direta dos painéis;
- As ligações articuladas de metal entre as plataformas. Um sistema é formado por várias plataformas e elas são entre ligadas por esses acoplamentos (correntes ou cabos de metal) que permitem que elas se desloquem horizontalmente e verticalmente para adaptação ao perfil irregular da superfície do reservatório;
- Acoplamentos flexíveis de borracha ou outros materiais flexíveis permitindo a movimentação das plataformas entre si;
- Cordas para fixação da estrutura às bordas e ao fundo do reservatório;
- Sistema de ancoragem rígida. Normalmente são estacas de concretos que transmitem as forças sofridas pelas mudanças do nível da água mantendo o sistema equilibrado e na direção norte (hemisfério sul). Podem ser instalados na margem ou no fundo do reservatório; e
- Cabeamento para ligação do sistema a rede elétrica. A conexão pode ser feita com cabos submersos ou flutuantes, mas é obrigatório que a estrutura seja robusta, impermeável e resistente a altas temperaturas. [37]

A figura 17 apresentada a seguir ilustra uma estrutura flutuante:

Figura 17: Estrutura do sistema flutuante.



Fonte: Adaptado de [35]

A inclinação das placas nesses tipos de sistemas deve ser muito bem avaliada já que pode representar ganho na geração de energia. A relação entre ângulo de inclinação e área de instalação define a potência do sistema. Deve se buscar a perpendicularidade da luz solar com o painel para maior geração e por isso a inclinação do painel dever ser de mesmo valor ou próximo a latitude do local, igual aos sistemas terrestres.

Os painéis são instalados voltados para uma mesma direção, no Brasil direção norte, produzindo atrás da linha deles uma sombra que atrapalha na geração. Quanto maior o ângulo de inclinação maior deverá ser a sombra e, portanto, maior também deverá ser o distanciamento entre as linhas de painéis exigindo maior área para instalação.

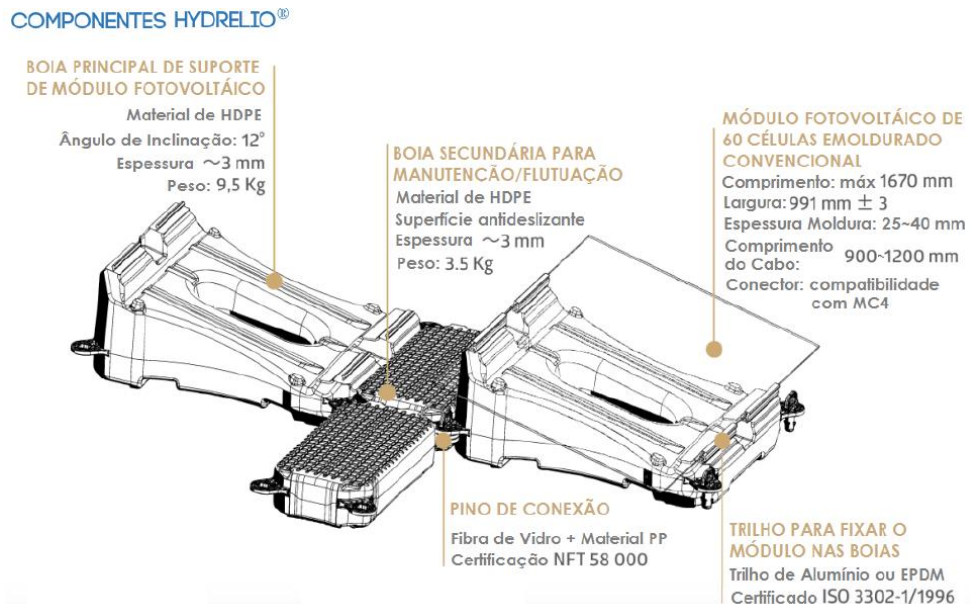
Segundo um experimento realizado por [36] em sistemas fotovoltaicos flutuantes quanto menores o ângulo de fixação do painel maior é seu rendimento. Além disso com uma geometria modular mais regular há menor efeito de deslocamento do sistema causado pelo vento. Segundo o experimento realizado por ele, o rendimento do painel para a inclinação de 30°, 15° e 10° dos painéis são respectivamente 82,49; 104,27 e 114,89 [kWh/m². ano]. [36]

Em relação ao material das placas, a maioria dos projetos já existentes utilizaram painéis cristalinos rígidos. Isso se deve ao fato de que foram instalados em reservatórios de água paradas como lagoas e lagos utilizando o design do sistema apresentado anteriormente. Para o ambiente marinho ou grandes reservatórios, como os de hidrelétricas, existe outra proposta que é a utilização de painéis fotovoltaicos flexíveis de filmes finos. Nesses tipos de instalações os sistemas são expostos a maiores cargas causadas pela ação de ventos fortes, ondas e marés, e os filmes finos apresentam maior flexibilidade diminuindo a resistência e forças em suas amarras. [34]

A empresa francesa *Ciel et Terre* patenteou uma plataforma flutuante chamada de *HYDRELIO*, apresentado na figura 18. Essa plataforma não requer mão de obra pesada para instalação e se adequa a reservatórios de grandes e pequenos portes. O material da boia é o HDPE (*High Density Polyethylene*, Polietileno de Alta Densidade), com um tempo de vida útil de aproximadamente 20 anos esse sistema é capaz de suportar ventos de até 190 km/h. [38]. Atualmente, esse tipo de método para construção de usinas flutuantes (sistemas com placas instaladas sobre estruturas flutuantes) é o mais usado entre os existentes pois representa uma estrutura simples comparadas as outras.

O conceito de painel flutuante de filme fino é mais simples em relação ao número de componentes do sistema, pois, as placas ficam em contato diretamente com a água e o sistema de flutuabilidade é colocada no laminado do painel ou em boias anexadas ao sistema, apresentando menor número de operações de manutenção e construção e, conseqüentemente, menor condições de falha.

Figura 18: Componente HYDRELIO patenteado pela empresa *Ciel et terre*.

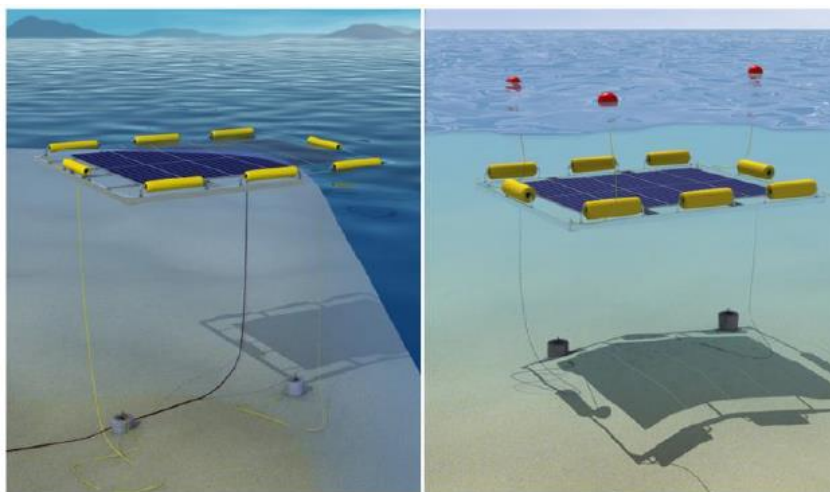


Fonte: [38]

Segundo conclusões de [33] sobre um experimento realizado pela Mirarco, onde um sistema de potência de 0,5 kWp de filme fino foi instalado em uma pequena lagoa no Canadá e outro sistema com placas fotovoltaicas idênticas instaladas em um terreno próximo, o sistema flutuante apresentou 5% de aumento no rendimento de geração elétrica em relação ao terrestre. Resultado devido principalmente ao arrefecimento térmico da água em relação ao solo. Porém, um fator observado no sistema flutuante a ser melhorado é o acúmulo de sujeira nos painéis que representam perda na geração.

Um outro conceito é a de um modelo com uma estrutura que possui painéis rígidos instalados diretamente sob a água. O arranjo da figura 19 é chamada de *Scintec*. Esse tipo de arranjo rígido não consegue se deformar e adequar a movimentação das ondas como os de filme fino e então é projetado para submergir até 2 metros. O controle da flutuação e submersão do sistema são feitas por boias ao seu redor, que através do bombeamento de água em seu interior consegue manter o sistema em equilíbrio. O limite de 2 metros de altura de água de submersão é pelo fato de ao ultrapassar esse valor a radiação incidente na superfície da placa não ser efetiva. Porém, a submersão ajuda no arrefecimento dos painéis e limpeza. [39]

Figura 19: Conceito de painel fotovoltaico submergível.



Fonte: [35]

4.3.3 Sistemas em Flutuantes em Operação

O Japão é o país que possui mais instalações de usinas flutuantes contando com 45 plantas em operação que proporcionam uma capacidade instalada de 56,5 MW. O que favorece esse tipo de instalação no país é o incentivo fiscal à energia solar e ausência de terras para essa geração. O maior sistema japonês localizado na cidade de Kanto conta com 27.456 painéis que proporcionam ao sistema uma capacidade de geração de 7.750,4 MWp, cobrindo uma área de aproximadamente 7,43 hectares (74.300 m²) correspondendo 57,5% da superfície do lago. [40]

A maior usina fotovoltaica em operação no mundo, em 2016, era localizada na região de Anhui na China com 20 MWp de capacidade. Porém, em 2017 na mesma região foi inaugurada uma outra planta com 40 MWp de capacidade de geração conectada à rede de transmissão local. [40]

O Brasil é pioneiro na instalação desses sistemas flutuantes em reservatórios de hidrelétricas. A primeira instalação usada principalmente para teste foi realizada no Amazonas no reservatório da hidrelétrica da Balbina, onde foram instalados 16 módulos fotovoltaicos com geração de 4 kW e ocupando uma área de 64 m². Se ampliado, o sistema aproveitará das estruturas da estação elétrica já existente para injetar a potencia na rede. A hidrelétrica tem capacidade instalada de 250 MW mas representa fator de capacidade de apenas 32% significando uma potência firme de 80 MW, o que possibilita o uso da estrutura por outra fonte. A área alagada é de 4.437,72 km² o que disponibiliza grande área para o uso de sistemas flutuantes. [41]

Outra obra piloto no Brasil foi instalada na usina hidrelétrica de Sobradinho, contando com os mesmos 16 módulos e ampliação para 5MW de potência. A usina também é subutilizada com baixo fator de capacidade e apresenta regime climático diferente da usina de Balbina, permitindo avaliar os impactos na eficiência de geração sobre diferentes condições climáticas. [38]. Essas duas instalações fazem parte de um projeto entre a Chesf (Companhia Elétrica do São Francisco), a Eletronorte e as empresas Sunlution e WEG, que por serem projetos pioneiros, devem apresentar resultados para avaliar a viabilidade desse tipo de instalação. [42]

No ano de 2017, um grande projeto piloto, apresentado na figura 22, foi instalado na represa da barragem de Alto Rabagão em Montalegre, Portugal. Foram instalados 840 módulos fotovoltaicos ocupando uma área de 2.500 m² com potência de 220 kWp. O sistema foi conectado à rede a partir de cabos de extensão submersos e a estrutura foi ancorado ao reservatório a uma profundidade de 60 metros, com adequação para uma variação de 30m.

Figura 20: Usina Piloto Flutuante em Alto Rabagão, Portugal.



Fonte: [45] e [46]

Capítulo 5

5.1 Conclusão

Diante do atual panorama energético do mundo se observa a necessidade da busca por fontes de energias alternativas de forma a contribuir, principalmente, com a preservação dos recursos naturais e a diminuição dos impactos ambientais. A demanda de energia deverá crescer em alta escala devido ao crescimento populacional e também, à maior utilização da tecnologia no cotidiano das pessoas e nos processos industriais.

Dentre as fontes alternativas, a energia solar e eólica são as que mais se desenvolvem, devido ao fato de se apresentarem viável em aspectos econômicos e técnicos. Recentemente, 2015, a China ocupou o primeiro lugar no *ranking* de geração fotovoltaica, seguida de Alemanha, Estados Unidos e Itália, o que demonstra o potencial dessa fonte em relação as outras em conseguir suprir grandes demandas com instalações de menor tempo de construção.

O Brasil por ocupar uma posição geográfica favorável ao desenvolvimento da energia fotovoltaica, devido principalmente a alta taxa de irradiação, e também a vantagem para a fabricação de módulos fotovoltaicos devido as grandes reservas de silício, entretanto tem uma tímida participação da energia solar na matriz energética. Recentemente o país reconheceu a necessidade da diversificação da matriz de energia elétrica, onde a energia hidráulica é dominante, com a necessidade do acionamento das termoelétricas diante das crises hídricas enfrentadas.

Em um futuro próximo, o Brasil deverá apresentar um crescimento considerável de geração fotovoltaica que deverá ser liderado pelo aumento do número de instalações de sistema distribuídos devido aos recentes incentivos governamentais e programas que deverão impulsionar o crescimento dessa tecnologia no mercado de energia.

A proposta de um sistema híbrido de energia hidrelétrica e fotovoltaica é favorável principalmente quando se observa em certos pontos a complementariedade entre as duas fontes. Um bom modelo para esse tipo de sistema é o de operar duas barras em paralelo, uma CA e uma CC de forma que o operador do sistema consiga administrar o sistema diante da disponibilidade dos recursos e da demanda por energia, de forma a amenizar o efeito intermitente na curva de geração fotovoltaica e controlar o nível da reserva

A utilização dos sistemas fotovoltaicos flutuantes em hidrelétricas ainda é uma tecnologia em desenvolvimento que não apresenta muitos projetos instalados, mas em teoria já apresenta resultados interessantes, como a maior eficiência energética dos painéis e a

menor evaporação da água nos reservatórios. A instalação desse tipo de estrutura é uma proposta viável para ser a fonte do sistema híbrido de energia se considerado, principalmente, a proximidade com a rede já existente da hidrelétrica.

O crescimento da geração fotovoltaica no Brasil representa que o país deve acompanhar o cenário mundial e seguir esse caminho para solucionar o problema da diversificação da matriz energética. Diante das condições, a utilização de sistemas híbridos hidrelétricos e fotovoltaicos é uma proposta interessante que deverá apresentar resultados positivos a partir de seu estudo e desenvolvimento.

Referências Bibliográficas

- [1] Edgard Júnior, ONU NEWS. Disponível em <<https://news.un.org/pt/story/2017/06/1589091-populacao-mundial-atingiu-76-bilhoes-de-habitantes>>. Acessado em 01/11/2018.
- [2] EIA's International Energy Outlook 2017 (IEO2017). Disponível em <[https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf)> Acesso em: julho,2017.
- [3] Resenha Energética Brasileira 2017 ano Base 2016, Departamento de Informações e Estudos Energéticos Ministério de Minas e Energia 2017. Disponível em www.mme.gov.br
- [4] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Technology roadmap: solar photovoltaic energy. France: IEA, 2014. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf>. Acesso em: 10/08/2018.
- [5] ANEEL, Resenha Energética Brasileira 2018. Disponível em <<http://www.eletronuclear.gov.br/ImprensaeMidias/Documents/Resenha%20Energ%C3%A9tica%202018%20-MME.pdf>>. Acessado em 01/11/2018.
- [6] BAHADARAH, H., Subhan A., Gandhidasan P., Rehman S. Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions. *Energy*. vol.59, p445-453, 2013.
- [7] Mauad, Frederico Fábio. Energia renovável no Brasil: análise das principais fontes energéticas renováveis brasileiras/ Frederico Fábio Mauad, Luciana da Costa Ferreira, Tatiana Costa Guimarães Trindade. São Carlos :EESC/USP, 2017.
- [8] EIA's International Energy Outlook 2017 (IEO2017). Disponível em <[https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf)> Acesso em: julho,2017.
- [9] ABRADÉE, Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica. Disponível em <<http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/redes-de-energia-eletrica/>>. Acessado em 11/07/2018.
- [10] ANEEL, Atlas da Energia Elétrica do Brasil. Disponível em <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf>>. Acessado em 11/07/2018.
- [11] International Energy Agency (IEA). Snapshot of global photovoltaic markets. Mary Brunisholz, IEA PVPS, 2016.
- [12] Ministério de Minas e Energia (MME). Boletim mensal de monitoramento do setor elétrico – dezembro de 2016. Brasília: MME, 2017.
- [13] European Database for Daylight and Solar Radiation, 2005.
- [14] <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>

- [15] VALLÊRA, A. M. Meio Século de História Fovoltaica. Gazeta de Física, Campo Grande.
- [16] PEREIRA, Enio Bueno, MARTINS, Fernando Ramos, ABREU, Samuel Luna de, RÜTHER, Ricardo. Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2006. 60p. São José dos Campos: INPE.
- [17] Guimarães Vieira Ribeiro, Uirê. Estudo da Viabilidade Economica de Instalação de Fontes de Energia Renováveis Baseadas em Células Fotovoltaicas Para o Uso Residencial. São Carlos, 2012.
- [18] MONTENEGRO, A. A. Avaliação do retorno do investimento em sistemas fotovoltaicos integrados a residências unifamiliares urbanas no Brasil. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - UFSC. Florianópolis, SC. 2013.
- [19] PINHO, J.T.; GALDINO, M.A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Ed.rev.e atual. Rio de Janeiro: Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES, CEPEL, CRESESB, 2014.
- [20] BELUCO, ALEXANDRE. Bases Para Uma Metodologia de Dimensionamento de Aproveitamentos Híbridos Baseados em Energia Hidrelétrica Fotovoltaica. Porto Alegre, 2001.
- [21] VILLALVA, M.G. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. 3.ed. São Paulo: Érica, 2015.
- [22] CARVALHO, P. C. M.; JUCÁ, S. C. S.; FREIRE, C. A. S. Programa didático de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos autônomos. Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia – COBENGE. Rio de Janeiro, 2003.
- [23] SEGUEL, J. I. L. Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital. Dissertação Mestrado. Belo Horizonte: UFMG, 2009.
- [24] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução Normativa N°786, de 17 de Outubro de 2017. Disponível em <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2017786.pdf>>
- [25] JANNUZZI, G.M. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica no Brasil: panorama da atual legislação. Campinas: Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina, 2009.
- [26] TOLMASQUIM, M. T. Energia Renovavel: Hidraulica, Biomassa, Eolica, Solar, Oceanica. EPE. Rio de Janeiro, RJ. 2016.
- [27] ONS - Operador Nacional do Setor Elétrico. Evaporações Liquidadas nas Usinas Hidrelétricas. Rio de Janeiro, RJ. 2004.

- [28] Lisita Júnior, Orlando. Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede: Estudo de caso de 3 kWp Instalados no Estacionamento do IEE-USP/ Orlando Lisita Júnior; Orientador Roberto Zilles. São Paulo, 2005.
- [29] LORENZO, Eduardo, Zilles, Roberto. El Generador fotovoltaico. In: LORENZO, Eduardo Org. Electricidad solar: ingeniería de los sistemas fotovoltaicos. Sevilla: Progensa, 1994.
- [30] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5410: instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: 2004.
- [31] CAAMAÑO, Estefanía M. Edificios Fotovoltaicos Conectados a la red eléctrica: Caracterización y análisis. Madrid, 1998. Universidad Politécnica de Madrid, 1998.
- [32] Ahlert, Vanessa Sette Campos. Aplicação de sistemas fotovoltaicos flutuantes em reservatórios de hidrelétricas – Estudo de caso em uma hidrelétrica brasileira / Vanessa Sette Campos Ahlert. – Rio de Janeiro, 2017.
- [33] TRAPANI, K. and SANTAFÉ, M.R., A review of floating photovoltaic installations: 2007–2013. *Prog. Photovolt: Res. Appl.* (2014).
- [34] Strangueto, Kanina Maretti, Estimativa do Potencial Brasileiro de Produção de Energia Elétrica Através de Sistemas fotovoltaicos flutuantes em reservatórios de hidroelétricas/ Karina Maretti Strangueto-Campinas, SP, 2016.
- [35] SANTAFÉ, Miguel Redón, SOLER, Juan Bautista Torregrosa, ROMERO, Francisco Javier Sánchez, GISBERT, Pablo S. Ferrer, GOZÁLVEZ, José Javier Ferrán, GISBERT, Carlos M. Ferrer. Theoretical and experimental analysis of a floating photovoltaic cover for water irrigation reservoirs. *Energy*.
- [36] FERRER-GISBERT, Carlos; FERRÁN-GOZÁLVEZ, José J.; REDÓN-SANTAFÉ, Miguel; FERRER-GISBERT, Pablo; SÁNCHEZ-ROMERO, Francisco J., TORREGROSA-SOLER, Juan Bautista. A new photovoltaic floating cover system for water reservoirs. *Renewable Energy*.
- [37] FERREIRA, R.S.A. Apontamentos de defesa de Tese 25/02/2016. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas-SP.
- [38] CIEL ET TERRE. Hydrelío Technology. 2017b. Disponível em: <<http://www.cieletterre.net/hydrelío-technology/>>. Acesso em: 14/10/2018.
- [39] ROSA-CLOT, M.; ROSA-CLOT, P.; CARRARA S.; Apparatus and method for generating electricity using photovoltaic painéis.
- [40] MINAMINO, S. Floating Solar Plants: Niche Rising to the Surface? Solarplaza. 11 nov. 2016. Disponível em: <<https://www.solarplaza.com/channels/top-10s/11634/floating-solarplants-niche-rising-surface>>. Acesso em: 16/10/2018.

- [41] ELETROBRAS. Projeto inédito de geração solar em hidrelétricas inicia em Balbina. 2016. Disponível em: <<http://eletrobras.com/pt/Lists/noticias/ExibeNoticias.aspx?ID=163>>. Acesso em: 20/10/ 2018.
- [42] CHESF – Companhia Hidroelétrica do São Francisco. Demonstrações financeiras 2016. Recife, PE. 2017.
- [43] MME/EPE – Ministério de Minas e Energia / Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2024. Brasília, 467p. 2015. Disponível em:<<http://www.epe.gov.br/PDEE/Relat%C3%B3rio%20Final%20do%20PDE%202024.pdf>>.
- [44] EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Nota Técnica. Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira. Rio de Janeiro. 2012. Disponível em <http://www.epe.gov.br/geracao/documents/estudos_23/nt_energiasolar_2012.pdf>.
- [45] Disponível em: <<http://www.portalrenovavel.com.br/fotovoltaica/renovaveis-projeto-inovador-da-edp-junta-agua-e-sol-na-producao-de-eletricidade/>>. Acessado em 10/11/2018.
- [46] Disponível em: <https://www.huffpostbrasil.com/entry/hydro-solar-plant_us_595f96dee4b02e9bdb0c0fa6>. Acessado em 10/11/2018.