



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

PERSPECTIVAS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL

Andressa Elisa Bade de Castro Pedro

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Walter Issamu Suemitsu

Rio de Janeiro
Julho de 2018

PERSPECTIVAS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL

Andressa Elisa Bade de Castro Pedro

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Examinado por:

Prof. Walter Issamu Suemitsu, Dr.Ing.

Prof. Sergio Sami Hazan, Ph.D.

Prof. Jorge Luiz do Nascimento, Dr.Eng.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JULHO DE 2018

Bade de Castro Pedro, Andressa Elisa

Perspectivas da Geração Distribuída no Brasil/Andressa Elisa Bade de Castro Pedro. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2018.

XII, 50 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Walter Issamu Suemitsu

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Elétrica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 47 – 50.

1. Geração Distribuída. 2. Energia Solar Fotovoltaica.
3. Energia Renovável. I. Issamu Suemitsu, Walter. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Elétrica. III. Perspectivas da Geração Distribuída no Brasil.

*"A ciência é, portanto, uma
perversão de si mesma, a menos
que tenha como fim último,
melhorar a humanidade."
Nikola Tesla*

Agradecimentos

Gostaria de agradecer, primeiramente, aos meus pais, Izabel e Ricardo, pelo apoio incondicional dado durante toda esta trajetória. Vocês são exemplos de pessoas e profissionais na minha vida. Nada disso seria possível sem vocês.

Agradeço também ao professor Walter, pela orientação e paciência em tão pouco tempo. Muito obrigada por tornar esse trabalho final possível.

Aos amigos que a faculdade me deu, muito obrigada. Aos que estiveram do começo ao fim: Bruno, Camila, Gabriel, Marianna, Priscila e Weslly, obrigada por partilharem os sucessos e fracassos comigo. Certamente a faculdade não teria sido a mesma sem vocês. Obrigada também às surpresas que a faculdade me deu no final dessa trajetória - Carolina, Isabella e Vitória -, por alegrarem meus dias nessa reta final.

Gostaria de agradecer também àqueles que contribuíram de alguma forma nessa caminhada. Mesmo não estando mais presentes na minha vida, vocês foram fundamentais para uma experiência acadêmica completa.

À todos do ONS, pela confiança depositada e pelo incentivo dado para esse início de carreira.

Ao meu namorado, Gabriel, por toda a paciência, compreensão e carinho nesses últimos anos. Obrigada por tudo.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

PERSPECTIVAS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL

Andressa Elisa Bade de Castro Pedro

Julho/2018

Orientador: Walter Issamu Suemitsu

Curso: Engenharia Elétrica

Apresenta-se, neste trabalho de conclusão do curso de graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, uma análise da situação atual da Geração Distribuída no Brasil em caráter técnico, e quais as perspectivas de crescimento para o futuro. Foi dada maior ênfase à Micro e Minigeração Distribuída, uma vez que há previsão de maior crescimento nesse tipo de geração. O objetivo é apresentar o cenário atual dessa modalidade de geração no Brasil, com uma análise dos motivos que levam a esse cenário, além de expor sua crescente relevância na matriz energética brasileira.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

THE FUTURE OF THE DISTRIBUTED GENERATION IN BRAZIL

Andressa Elisa Bade de Castro Pedro

July/2018

Advisor: Walter Issamu Suemitsu

Course: Electrical Engineering

Presented here, in this final year project of the Electrical Engineering degree of the Federal University of Rio de Janeiro, is a technical analysis of the current situation of Distributed Generation in Brazil and what are the prospects for the future. It was given a special focus on Micro and Distributed Microgeneration, considering it is the type of generation with biggest growth rates. The purpose of this work is to demonstrate the position that this generation holds in Brazil, with an analysis of the reasons for why it is in the afore mentioned position as well as showcase its growing relevance in Brazil's energy matrix.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
1 Introdução	1
1.1 Apresentação	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Estrutura do Trabalho	2
2 Geração Distribuída	3
2.1 Conceito	3
2.2 Micro e Minigeração distribuídas	3
2.3 Tipologias	4
2.4 Aspectos Positivos e Negativos da Geração Distribuída	4
3 Fontes de energia na Geração Distribuída	6
3.1 Energia Eólica	6
3.1.1 Aspectos Gerais	6
3.1.2 Principais Fundamentos	7
3.1.3 Situação Mundial Atual	9
3.1.4 Complementaridade com UHE	10
3.2 Energia Termelétrica utilizando biocombustíveis	10
3.2.1 Principais Fundamentos	11
3.2.2 Fontes de biocombustível	13
3.3 Energia Solar Fotovoltaica	14
3.3.1 Aspectos Gerais	14
3.3.2 Tipos de Células Fotovoltaicas	15
3.3.3 Principais Fundamentos	16
3.3.4 Situação Mundial Atual	17
3.4 Energia Hidráulica	19
3.4.1 Aspectos Gerais	19
3.4.2 Principais Fundamentos	20

3.4.3	Situação Mundial Atual	21
4	A atual Geração Distribuída no Brasil	23
4.1	Dados atuais de Micro e Minigeração Distribuída	23
4.2	Energia Eólica	25
4.3	Energia Hidráulica	27
4.4	Energia Térmica	28
4.5	Energia Solar Fotovoltaica	29
5	Perspectivas da Geração Distribuída no Brasil	33
5.1	Pequena e Média Escala	33
5.1.1	Geração Distribuída Fotovoltaica a longo prazo	34
5.1.2	Geração Distribuída de Biogás a longo prazo	37
5.1.3	Pequena escala no médio prazo	39
5.2	Larga Escala	40
5.2.1	Premissas	41
5.2.2	Previsões a longo prazo	42
5.2.3	Previsões a médio prazo	44
6	Conclusão e Trabalho Futuro	45
6.1	Conclusão	45
6.2	Trabalho Futuro	46
	Referências Bibliográficas	47

Lista de Figuras

1.1	Matriz de Energia Elétrica do Brasil. Fonte: [10]	1
3.1	Capacidade total instalada de energia eólica no mundo. Fonte: [8]	9
3.2	Complementaridade entre usinas hidrelétricas e eólicas. Fonte: [11]	10
3.3	Figura esquemática de turbina a vapor de contra-pressão para cogeração de calor e eletricidade usando biomassa como combustível. Fonte: [12]	11
3.4	Figura esquemática do ciclo combinado. Fonte: [12]	12
3.5	Figura esquemática de ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração. Fonte: [12]	13
3.6	Esquema simplificado do sistema solar fotovoltaico. Fonte: [13]	16
3.7	Capacidade de novas redes conectadas (alto) e capacidade acumulada de redes solares fotovoltaicas (baixo). Fonte: [8]	18
3.8	Figura esquemática de uma usina hidrelétrica. Fonte: [17]	20
3.9	Custo total de instalação de uma usina hidrelétrica, por país/região, em 2016. Fonte: [8]	22
4.1	Número de micro e minigeradores distribuídos. Fonte: [19]	24
4.2	Potência instalada (MW) de micro e minigeradores distribuídos. Fonte: [19]	24
4.3	Geradores Eólicos por classe de consumo. Fonte: [18]	25
4.4	Velocidade do vento média sazonal no Brasil (m/s). Fonte: [23]	26
4.5	Geradores hidráulicos por classe de consumo. Fonte: [18]	27
4.6	Geradores térmicos por classe de consumo. Fonte: [18]	29
4.7	Geradores fotovoltaicos por classe de consumo. Fonte: [18]	30
4.8	Radiação solar global diária - média anual típica (Wh/m ² .dia). Fonte: [11]	31
5.1	Previsão da potência instalada fotovoltaica distribuída acumulada. Fonte: [6]	36
5.2	Previsão da energia gerada fotovoltaica distribuída. Fonte: [6]	36

5.3	Projeção da penetração do biometano para GD versus seu potencial teórico. Fonte: [6]	38
5.4	Previsão da energia gerada distribuída utilizando biogás. Fonte: [6]	39
5.5	Capacidade instalada e energia a partir da geração distribuída fotovoltaica e de biogás. Fonte: [30]	40
5.6	Grandes consumidores industriais: consumo de eletricidade, 2013-2050 (TWh). Fonte: [6]	43
5.7	Projeção de autoprodução total de eletricidade, de 2013 a 2050 (TWh). Fonte: [6]	44
5.8	Projeção de autoprodução de eletricidade no horizonte decenal, 2015-2024 (TWh). Fonte: [31]	44

Lista de Tabelas

4.1	Unidades Consumidoras com Geração Distribuída. Fonte: [18]	23
4.2	Fontes de energia primária na Biomassa . Fonte: [18]	28
4.3	Parâmetros de desempenho de um sistema fotovoltaico de referência de 1500 W_p . Fonte: [29]	32
5.1	Perspectiva de redução de custos dos sistemas fotovoltaicos (R\$/ W_p). Fonte: [6]	35
5.2	Potência típica por faixa de consumo. Fonte: [6]	35
5.3	Projeções da geração distribuída fotovoltaica. Fonte: [6]	37
5.4	Indicadores/Premissas para segmentos industriais selecionados. Fonte: [6]	42
5.5	Grandes consumidores industriais: autoprodução por segmento (GWh). Fonte: [6]	42

Capítulo 1

Introdução

1.1 Apresentação

A principal forma de geração de energia no país é obtida por meio de usinas hidrelétricas, que utilizam a água como fonte de energia (Figura 1.1). No entanto, o Brasil vive atualmente uma crise energética causada pela falta de investimento em novas infra-estruturas e pelo baixo nível dos reservatórios. Além disso, questões ambientais impossibilitam a construção de grandes hidrelétricas, uma vez que, para construir esse tipo de usina deve-se inundar grandes espaços, normalmente em áreas de proteção ambiental.

Matriz de Energia Elétrica Brasileira

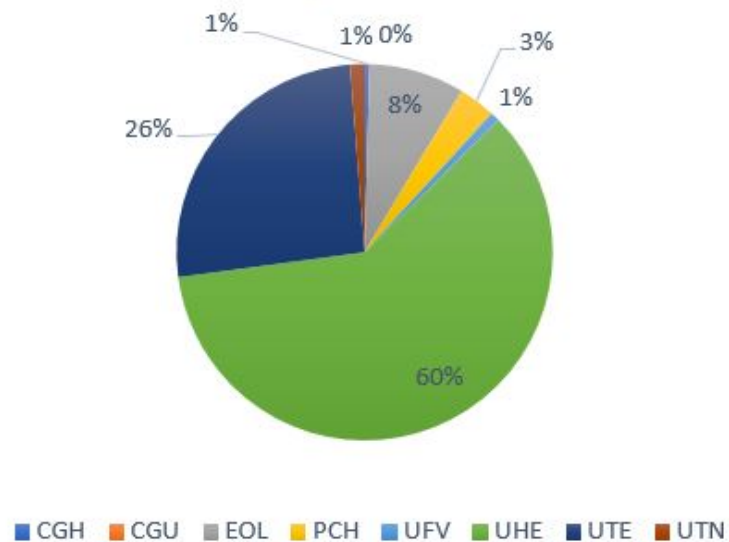


Figura 1.1: Matriz de Energia Elétrica do Brasil. Fonte: [10]

Uma alternativa para suprir a crescente demanda de energia no país é a geração localizada perto dos pontos de consumo, a chamada geração distribuída (GD). Essa modalidade de geração permite ao consumidor gerar sua própria energia e, a partir

da Resolução Normativa no 482 da ANEEL [1], é possível, além de gerar sua própria energia, injetar o excedente na rede elétrica e posteriormente ser compensado com o consumo de energia elétrica ativa, transformando o consumidor em um prosumidor.

Essa forma de geração vem ganhando cada vez mais destaque e incentivo no Brasil por possibilitar a diversificação da matriz energética nacional, por diminuir as perdas do sistema e por postergar o investimento na expansão da transmissão e distribuição de energia. Além disso, para o consumidor, essa modalidade traz maior autonomia no consumo de energia e economia nas despesas com as tarifas de energia elétrica, cada vez mais caras.

1.2 Objetivo

Nesse projeto será feita uma análise da situação atual da Geração Distribuída no Brasil e quais as perspectivas de crescimento para o futuro no longo e médio prazos de acordo com três estudos realizados pela Empresa de Pesquisa Energética. O objetivo é apresentar o cenário atual dessa modalidade de geração no Brasil, com uma análise dos motivos que levam a esse cenário, além de expor sua crescente relevância na matriz energética brasileira.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho apresenta seis capítulos. Nesse primeiro capítulo foi visto o objetivo deste trabalho e a importância da inserção da Geração Distribuída no cenário energético brasileiro.

No Capítulo 2 será apresentada uma visão geral sobre a Geração Distribuída, com o objetivo da contextualização do leitor acerca do tema do trabalho.

No Capítulo 3 serão mostradas informações gerais sobre as quatro fontes de geração utilizadas na GD, sendo elas a solar fotovoltaica, eólica, térmica utilizando biomassa e as pequenas hidrelétricas.

Posteriormente, no Capítulo 4, será apresentada a atual situação da Geração Distribuída no Brasil, com a atual potência instalada de cada tipo de geração e motivos que levam uma fonte a ter mais adeptos que outra.

O Capítulo 5 trará as projeções deste tipo de geração no país, no horizonte até 2050, discriminados pelos tipos de fonte que terão maior destaque na matriz energética brasileira para a Geração Distribuída.

Por fim, serão apresentadas as considerações finais sobre o presente estudo no Capítulo 6, além de uma sugestão de trabalho futuro. Em seguida, encontram-se as referências bibliográficas utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho.

Capítulo 2

Geração Distribuída

2.1 Conceito

A geração distribuída é a geração de energia elétrica realizada perto do seu consumidor final. Ela pode ser classificada por sua localização ou capacidade. De acordo com Pepermans [2], o International Council on Large Electric Systems (CIGRÉ) possui um grupo de estudos sobre geração distribuída que define esse tipo de geração como todas as unidades de geração com capacidade de 50 MW a 100 MW, geralmente conectadas à rede de distribuição de energia e que não são nem despachadas nem planejadas centralmente.

No Brasil, a geração distribuída foi definida de forma oficial a partir do Decreto nº 5163 de 30 de Julho de 2004 [3]:

“Art. 14. [...] Considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, [...] conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de empreendimento: I - hidrelétrico com capacidade instalada superior a 30 MW; e II - termelétrico, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a setenta e cinco por cento, conforme regulação da ANEEL, a ser estabelecida até dezembro de 2004. Parágrafo único. Os empreendimentos termelétricos que utilizem biomassa ou resíduos de processo como combustível não estarão limitados ao percentual de eficiência energética [...]”

2.2 Micro e Minigeração distribuídas

Existem dois tipos de geração distribuída mais difundidos e utilizados em áreas residenciais ou pequenos comércios: a microgeração e a minigeração distribuídas.

De acordo com as Resoluções Normativas nº 687 [4] e nº 786 [5], a microgeração distribuída refere-se a uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW, enquanto a minigeração distribuída diz respeito às centrais geradoras com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW e que utilize cogeração qualificada ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

2.3 Tipologias

De acordo com a EPE [6], existem quatro diferentes tipologias de geradores distribuídos. A primeira tipologia é a micro ou minigeração distribuída. Essa tipologia corresponde a geradores de pequena escala que seguem uma lógica de decisão dispersa e dependente das realidades dos consumidores individuais. O segundo tipo é a autoprodução industrial, geração que segue a lógica de investimento industrial de grandes projetos. O autoprodutor não pode comercializar sua energia excedente, sendo toda a energia gerada de uso exclusivo.

A Geração na Ponta é aquela onde o consumidor instala uma geração para retirar/reduzir o consumo e demanda de ponta, principalmente por conta do elevados custos de atendimento neste horário. O último tipo é a Cogeração ou Multigeração, esquemas em que há aproveitamento de resíduos gerados no processo industrial.

2.4 Aspectos Positivos e Negativos da Geração Distribuída

A geração distribuída apresenta diversas vantagens para todos os envolvidos. Para o consumidor, com tarifas de energia elevadas, gerar sua própria energia utilizando fonte fotovoltaica é uma alternativa para quem quer economizar. O investimento para instalação de uma geradora de energia na propriedade tem tempo de retorno variado no Brasil, indo de 3,36 anos em Belém, Pará, até 7,66 em Macapá, Amapá [7]. Com a implantação da tarifa branca esse ano, sendo a energia cobrada a diferentes taxas dependendo do horário, as fontes de GD são uma ótima opção para o consumidor que deseja reduzir os custos de energia no horário de ponta. Além disso, devido à sua modularidade, a GD atende a consumidores de diferentes perfis.

Para as concessionárias, a GD torna-se atraente por reduzir perdas ativas e reativas nas linhas de transmissão e distribuição. Em condições de sobrecarga, a GD alivia o sistema de transmissão e distribuição, levando a uma melhoria no fornecimento de energia.

Para a sociedade, as fontes de GD trazem diversidade à matriz energética nacio-

nal, o que leva a uma maior segurança no suprimento de energia, já que o país não será dependente de apenas uma fonte. Ela também contribui para o atendimento da demanda crescente de energia no país, o que posterga a construção de novas grandes usinas de energia. Além disso, as fontes de geração distribuída apresentam um menor tempo de implantação e estão sujeitas a menor burocracia, devido a menores problemas políticos e ambientais.

Como aspecto negativo, pode-se citar os impactos causados no sistema de proteção. O sistema elétrico convencional foi projetado para ter um fluxo de potência unidirecional proveniente das grandes usinas de geração. A ligação de sistemas de geração próximos aos consumidores injetando o excedente na rede pode acarretar fluxos de potência em direções contrárias às projetadas originalmente, o que afeta como a rede é impactada quando ocorre uma falha ou pico de carga. A interação entre os fluxos de potência proveniente de diferentes caminhos da rede pode trazer prejuízos na estabilidade e controle do sistema e colocar em risco equipamentos conectados à rede. Adicionalmente, existe a dificuldade para prever o crescimento exato da geração distribuída no país, prejudicando o planejamento da expansão da geração e da transmissão.

Para as distribuidoras de energia, a inserção das fontes de GD podem trazer mais custos, uma vez que devem ser feitos investimentos para adequar seu sistema de distribuição aos requisitos de controle, qualidade e proteção necessários para o bom funcionamento da rede.

Capítulo 3

Fontes de energia na Geração Distribuída

3.1 Energia Eólica

3.1.1 Aspectos Gerais

A energia eólica é a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento). Seu aproveitamento se dá utilizando-se turbinas eólicas, também chamadas de aerogeradores, que transformam a energia cinética do vento em energia mecânica e, após isso, em energia elétrica.

Uma turbina eólica é composta dos seguintes elementos:

- Uma torre, que permite elevar a turbina eólica até ventos mais regulares na camada limite atmosférica.
- Uma nave ou nacelle que contém o sistema mecânico.
- Um veio que permite a rotação das pás e transmite a energia mecânica ao gerador elétrico.
- As pás, que “absorvem” a energia cinética do vento.

As pás de uma turbina eólica são elementos essenciais cujos movimentos de rotação são responsáveis por girar o rotor do aerogerador, produzindo energia elétrica. Normalmente as turbinas eólicas possuem três pás, porém o mais importante não é o número de pás, mas sim a superfície por elas varrida. É possível encontrar turbinas com duas pás com a mesma eficiência que uma turbina eólica de 3 pás.

As turbinas eólicas têm duas principais características: o eixo da turbina e sua localização. Seu eixo pode ser horizontal ou vertical e ela pode estar localizada *onshore* (terrestre) ou *offshore* (marítimo). O tipo com eixo horizontal é o mais

comumente utilizado nos dois tipos de localização, sendo a turbina eólica *onshore* o tipo usado na geração distribuída.

3.1.2 Principais Fundamentos

De uma forma geral, um sistema de geração eólica é formado por uma turbina, responsável por captar o vento, uma caixa de engrenagens, o gerador, responsável por transformar a potência mecânica em elétrica e um conversor eletrônico.

As engrenagens têm a função de aumentar a velocidade na saída do eixo do rotor da turbina. A frequência da tensão de saída do gerador é afetada diretamente pela velocidade na entrada do gerador. Sendo essa frequência variável, é necessário um conversor eletrônico para conectar o sistema eólico à rede elétrica.

As turbinas eólicas podem ser divididas em dois tipos: turbinas com velocidade fixa e turbinas com velocidade variável, sendo o segundo tipo o mais empregado atualmente, por viabilizar o uso de um sistema de controle adequado que possa atuar rastreando a potência máxima da turbina, ou seja, permitindo que a turbina opere próximo ao ponto ótimo. As turbinas eólicas de velocidade fixa são conectadas diretamente ao sistema de potência, geralmente por meio do estator de um gerador de indução. A velocidade angular do rotor dessas turbinas permanece em torno de um valor fixo, seja pela ação de um controle do passo das pás ou pela ocorrência planejada de efeito estol (perda de sustentação). Já as turbinas de velocidade variável devem ser conectadas ao sistema elétrico por meio de conversores estáticos. Esse tipo de turbina permite que o aerogerador continue operando mesmo com variações na velocidade do vento. Para que a frequência de corrente gerada pelo aerogerador seja constante, é necessário o uso de um sistema de controle adequado.

Existem atualmente quatro diferentes tipos de geradores que podem ser utilizados no sistema. São eles:

- Gerador de Indução em Gaiola

Esse tipo de gerador pode ser utilizado em conjunto com os dois tipos de turbina, de velocidade fixa ou variável. Ao utilizá-lo com a turbina de velocidade variável, deve-se conectar a ele um *soft-starter* para proteger o sistema elétrico da corrente de partida que esse gerador pode alcançar, podendo ser superior a seis vezes o valor nominal. É necessário também utilizar uma caixa de engrenagens, uma vez que a velocidade do vento é muito baixa e necessitaria um gerador com muitos pólos para gerar uma tensão apropriada. Uma das vantagens da utilização desse tipo de gerador é o baixo custo de manutenção devido à sua construção simples e robusta.

- Gerador de Indução de Rotor Bobinado

É o tipo de gerador mais utilizado em sistemas eólicos. O controle do escorregamento e torque dessa máquina é executado através de conversores eletrônicos acoplados ao rotor. Pode operar nos modos subsíncrono e supersíncrono, normalmente sob uma faixa de operação em torno de 30% da velocidade síncrona, devendo o conversor acoplado ao rotor ser bi-direcional. Esse tipo de gerador tem se tornado popular para turbinas eólicas de velocidade variável pois o conversor eletrônico só precisa manipular uma fração da potência total, entre 20 e 30%.

- Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes

Este tipo de gerador é conectado diretamente à turbina eólica, e sua conexão à rede é feita por meio de dois conversores back-to-back. Neste tipo de conexão toda a energia produzida pelo gerador flui pelos conversores, sendo assim, a potência de cada conversor deve ser a mesma do gerador síncrono, tornando esse sistema mais caro. Apesar dos geradores síncronos de ímãs permanentes serem mais recentes, suas tecnologias de fabricação e operação já são bem maduras.

- Gerador Síncrono de Rotor Bobinado

Devido às exigências da conexão à rede elétrica, o interesse por este tipo de gerador tem aumentado. Algumas dessas exigências são o suporte de tensão durante condições de falta, controle da potência reativa em uma determinada faixa, limite da máxima geração de potência e transitórios de corrente na partida. Os geradores síncronos de rotor bobinado apresentam como desvantagem o peso e volume maiores e a necessidade de um conversor a mais, para controle da corrente de campo.

A equação que quantifica a potência mecânica extraída dos ventos pela turbina eólica é dada por:

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 c_p(\lambda, \beta) \quad (3.1)$$

Onde:

$$\lambda = \frac{R \omega_{wt}}{v_w} \quad (3.2)$$

Sendo:

c_p é o coeficiente de potência da turbina;
 λ é a relação entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento incidente (*tip speed ratio*);

ω_{wt} é a velocidade angular da turbina eólica (rad/s);

R é o raio da turbina (m);

ρ é a densidade do ar ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$);

A é a área varrida pelo rotor (m^2);

v_ω é a velocidade do vento incidente na turbina (m/s^2);

β é o ângulo de passo ($^\circ$).

O *Tip Speed Ratio* é essencial para o rastreamento do ponto de máxima potência, o ponto em que a potência fornecida pelo vento é máxima. Esse rastreamento é importante para a maximização da eficiência da turbina, uma vez que a mesma não pode operar em velocidades muito altas nem muito baixas. O coeficiente de potência da turbina c_p é a função da diferença entre a energia cinética da velocidade do vento que chega na turbina e que deixa a mesma. Seu valor máximo teórico é 0,5926, determinado pelo limite de Betz, porém, na prática, a eficiência de um rotor varia de 35 a 45%. Esse coeficiente depende das características aerodinâmicas da turbina.

3.1.3 Situação Mundial Atual

A energia eólica vem se tornando cada vez mais competitiva, uma vez que o custo de geração desse tipo de energia vem caindo ao longo dos últimos anos. No mundo, o custo da energia eólica produzida em terra (*onshore*) caiu 23% no período de 2010 a 2017 [8] e, no Brasil, no último leilão de energia nova o preço médio da contratação foi de R\$108/MWh. Essa tendência se dá devido à evolução da tecnologia, das características operacionais aplicadas à energia eólica, ao curto tempo necessário para sua instalação e operação e também ao custo zero do combustível, o vento.

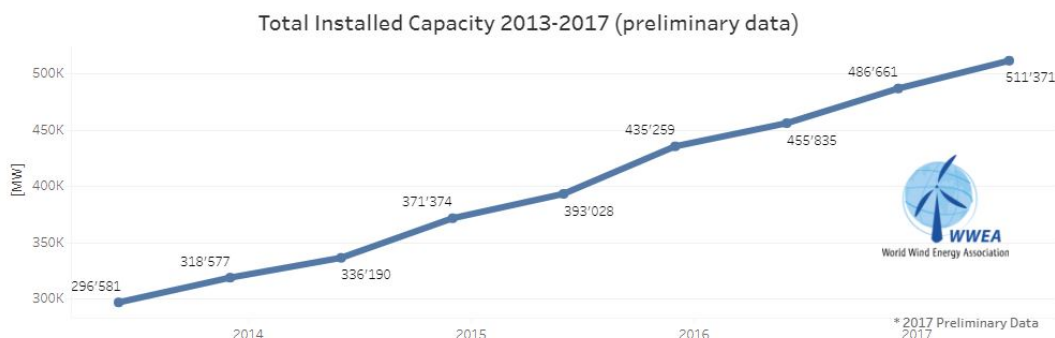


Figura 3.1: Capacidade total instalada de energia eólica no mundo. Fonte: [8]

Como consequência da baixa do preço, além de políticas de incentivo, a capacidade instalada acumulada no mundo tem crescido a uma taxa de 15% ao ano, de 2000 até 2016 [8]. No final de 2017 foi registrada uma capacidade instalada total de 539 GW, sendo 52,6 GW de novas instalações em 2017 [9]. Na Figura 3.1 é possível

ver a evolução da capacidade total instalada no mundo.

3.1.4 Complementaridade com UHE

É importante mencionar uma vantagem da utilização de energia eólica no Brasil: a complementaridade entre a usina eólica e a usina hidrelétrica. Sendo a energia hidrelétrica a principal fonte de energia elétrica do país, (cerca de 60% da potência instalada do país é formada por usinas hidrelétricas [10]), o país fica sujeito aos diferentes níveis de chuva, dependendo da época do ano. Curiosamente, o período com menor disponibilidade hídrica coincide com o período de maior potencial eólico no Nordeste, região com maior potencial eólico no Brasil. Esse cenário pode ser visto na Figura 3.2, do Atlas de Energia Elétrica do Brasil da ANEEL [11].

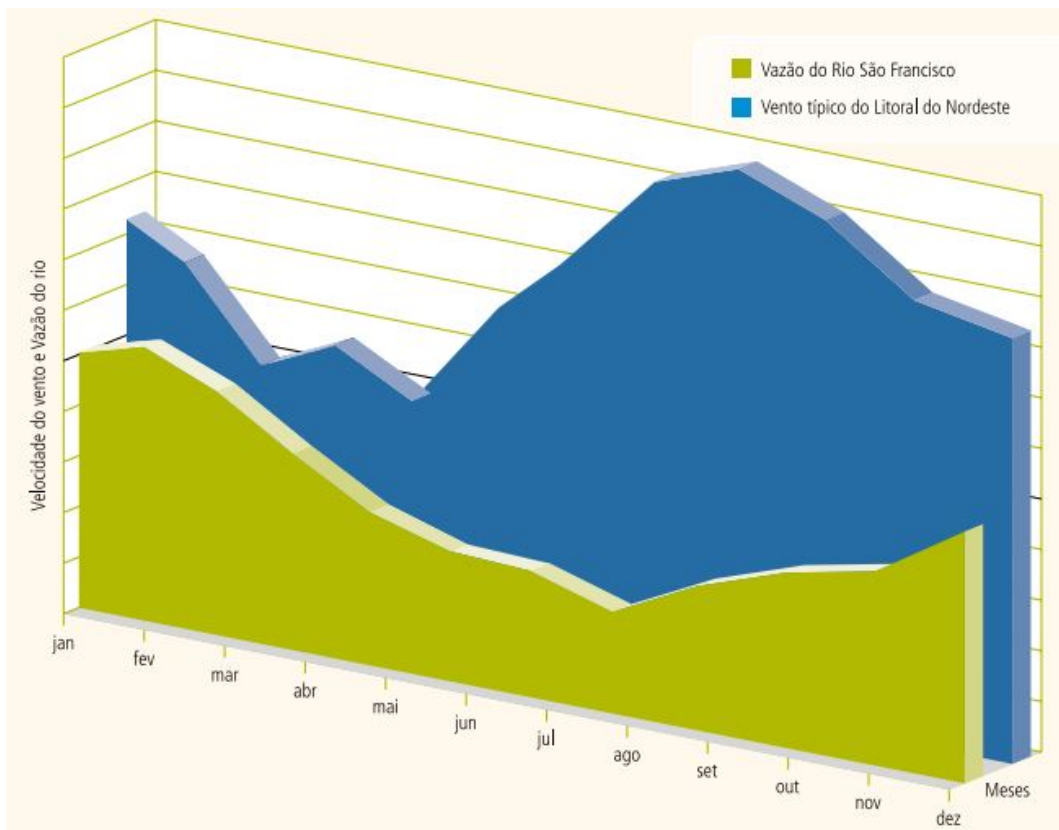


Figura 3.2: Complementaridade entre usinas hidrelétricas e eólicas. Fonte: [11]

3.2 Energia Termelétrica utilizando biocombustíveis

Energia termelétrica é aquela gerada a partir da queima de qualquer combustível que possa liberar calor. Esse combustível pode ser bagaço de diversos tipos de

plantas, restos de madeira, óleo combustível, óleo diesel, gás natural, urânio enriquecido e carvão natural. No caso da geração distribuída, é utilizada a biomassa como combustível. Biomassa é toda matéria orgânica de origem vegetal ou animal, excluindo matéria fóssil, utilizada na produção de energia. Ela pode ser obtida através de diversos recursos renováveis, como resíduos agrícolas, plantas, madeira, lixo e excrementos.

3.2.1 Principais Fundamentos

Existem várias rotas tecnológicas possíveis para a obtenção de energia elétrica utilizando biomassa. As três principais são:

- Ciclo a vapor com turbinas de contrapressão

É o processo mais disseminado atualmente. Nessa modalidade, a biomassa é queimada diretamente em caldeiras e a energia térmica gerada é utilizada na produção do vapor responsável por acionar as turbinas para geração de energia elétrica. Esse processo é empregado de forma integrada a processos produtivos, a chamada cogeração. A Figura 3.3 mostra o esquemático desse tipo de ciclo [12].

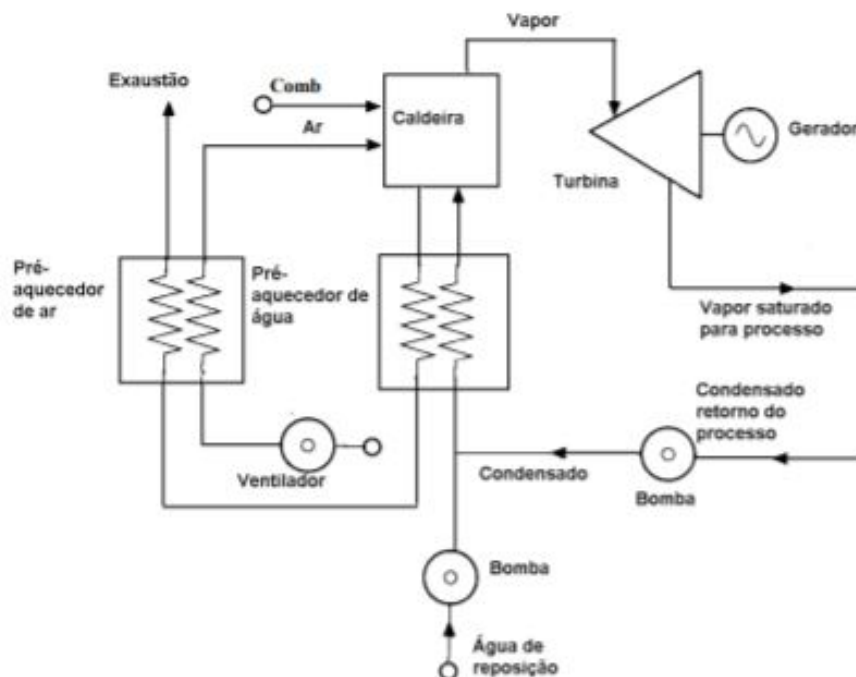


Figura 3.3: Figura esquemática de turbina a vapor de contra-pressão para cogeração de calor e eletricidade usando biomassa como combustível. Fonte: [12]

- Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração

Nessa rota, há um condensador na exaustão da turbina, responsável pela condensação total ou parcial do vapor ao final da realização do trabalho na turbina para atendimento às atividades mecânicas ou térmicas do processo produtivo. Quando utilizada em um processo de cogeração, a energia a ser condensada é retirada em um ponto intermediário da expansão do vapor. Esse processo tem uma maior eficiência quando comparado ao ciclo a vapor com turbinas de contrapressão por apresentar níveis determinados para aquecimento da água que alimentará a caldeira, permitindo maior volume de energia elétrica. Como desvantagem, sua instalação exige alto investimento quando comparado aos outros modelos.

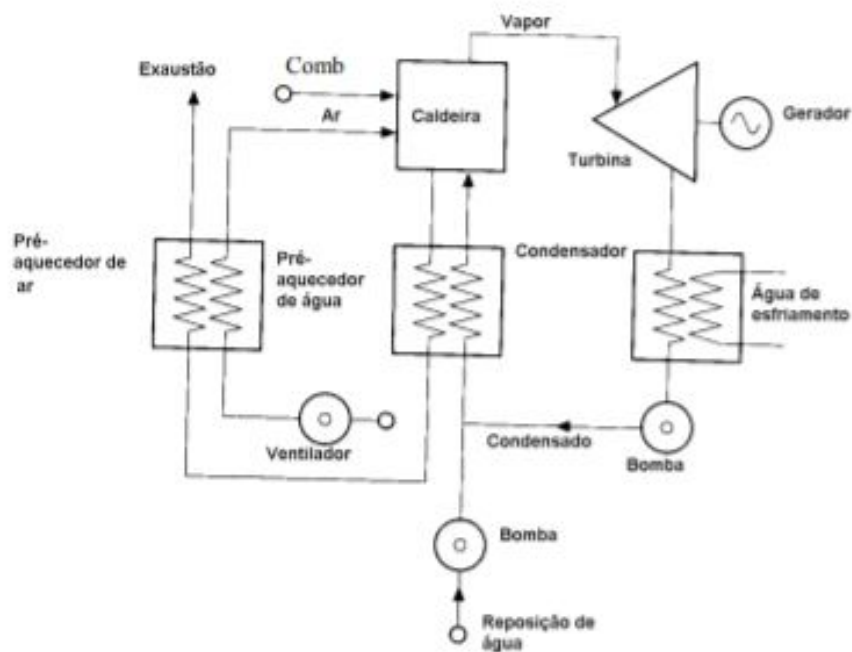


Figura 3.4: Figura esquemática do ciclo combinado. Fonte: [12]

- Ciclo combinado integrado à gaseificação da biomassa

Consiste na conversão de qualquer combustível - líquido ou sólido - em gás energético por meio da oxidação parcial em temperatura elevada. Ela é realizada em gaseificadores e produz um gás que pode ser usado em usinas térmicas movidas a gás para a produção de energia elétrica. Por se tratar de um ciclo combinado, seu acréscimo de potência alcançado é, em geral, da ordem de 50% da potência da turbina a gás e a eficiência global passa da média de 30% do ciclo simples e atinge valores em torno dos 55 a 60%.

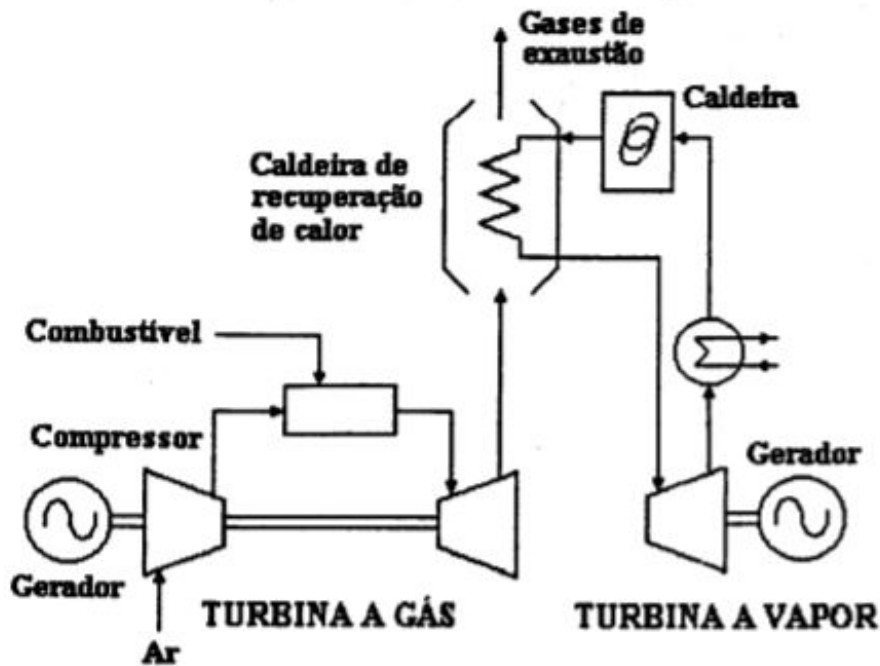


Figura 3.5: Figura esquemática de ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração. Fonte: [12]

3.2.2 Fontes de biocombustível

As principais origens da biomassa no Brasil são a florestal, agrícola e oriunda de rejeitos urbanos e industriais. A biomassa energética florestal é composta por pedaços de madeira (lenha) e também o licor negro, resíduo líquido proveniente do digestor após o processo de cozimento da madeira. Ela pode ser obtida a partir de florestas cultivadas ou até mesmo florestas nativas, quando há desflorestamento para abertura de áreas de agropecuária. Há ainda a possibilidade de obtenção da lenha através de atividades que processam ou utilizam a madeira para fins não energéticos, destacando-se a indústria de papel e celulose.

A biomassa energética agrícola é definida como os produtos e subprodutos oriundos de plantações não-florestais. No Brasil, destacam-se a cana-de-açúcar, arroz, capim elefante, milho e soja como biomassas agrícolas. Duas vantagens que podem ser citadas ao utilizar resíduos de plantações agrícolas para gerar energia é a possibilidade de fazer uma agricultura de energia sem haver competição com a de alimentos e a diminuição do lixo gerado por essa indústria.

Finalmente, a biomassa oriunda de rejeitos urbanos e industriais tem origens diversas, podendo ser do lixo ou do esgoto. O lixo, rejeito sólido urbano, é uma mistura heterogênea de materiais descartados pelos setores comerciais e residenciais, sendo composto de plásticos, vidros, papéis, matéria orgânica, entre outros. Existem três rotas tecnológicas utilizadas para o processamento da biomassa em estado sólido,

sendo que a que apresenta mais vantagem é a biodigestão anaeróbica, por possuir maior rendimento energético e por sua capacidade de despoluir. Já os rejeitos sólidos são descartados nas redes de esgoto e passam por tratamento em uma estação. Após esse tratamento, é produzida uma massa orgânica popularmente chamada de lodo. Essa massa orgânica pode ser então utilizada para a geração de energia elétrica através, também, da digestão anaeróbica.

3.3 Energia Solar Fotovoltaica

3.3.1 Aspectos Gerais

A energia solar se refere à energia proveniente da luz e calor do sol. Existem várias tecnologias capazes de utilizá-la, como o aquecimento solar, que usa o calor do sol diretamente para aquecer outro meio (geralmente água), e as placas fotovoltaicas. A radiação solar que chega ao solo terrestre divide-se em três tipos:

- Radiação direta: Refere-se à radiação que atinge os painéis solares sem sofrer mudança em sua trajetória;
- Radiação difusa: Radiação que chega aos painéis após sofrer variação causada por fatores como nuvens, chuva, entre outros;
- Radiação refletida: É a radiação solar que foi refletida no solo.

Das tecnologias existentes, a forma de uso mais disseminada é a energia solar fotovoltaica. Essa tecnologia se baseia no uso de módulos solares, constituídos de células fotovoltaicas, que fazem a conversão da radiação em eletricidade. Essas células fotovoltaicas são fabricadas com materiais semicondutores, sendo o material mais popular o silício. Quando os fótons (partículas que formam a luz solar) atingem as células fotovoltaicas, parte deles é absorvida, despertando os elétrons do material semicondutor e, assim, gerando eletricidade. Quanto maior a intensidade da luz solar, maior o fluxo da eletricidade gerada.

Uma das vantagens de converter a energia solar por meio de células fotovoltaicas é que, diferente das outras tecnologias disponíveis, ela gera energia elétrica mesmo em condições adversas do tempo, uma vez que este sistema de geração capta não só a radiação direta, mas também a difusa e a refletida. Assim, mesmo quando está nublado ou chovendo, esse sistema é capaz de gerar energia elétrica, ainda que em menor quantidade.

Outra vantagem que vale a pena mencionar é o fato das placas solares apresentarem modularidade. Isso permite maior flexibilização de acordo com a demanda de energia do consumidor, permitindo ser uma tecnologia utilizada por diferentes perfis de consumidores.

3.3.2 Tipos de Células Fotovoltaicas

Atualmente existe uma gama de células fotovoltaicas disponíveis no mercado, cada uma tendo aspectos próprios, dependendo do material do qual as células são feitas. A seguir são descritas as características dos principais tipos de células utilizadas.

- Células de Silício Monocristalino

É a tecnologia mais antiga e possui a maior eficiência do mercado, variando de 15 a 22%. O painel solar com esse tipo de célula é formado a partir de um único cristal de silício ultrapuro fatiado, fazendo-se assim lâminas de silício individuais que são tratadas e transformadas em células fotovoltaicas. Como vantagens do uso dessa célula, temos o pouco espaço ocupado por elas, já que é necessário menos células fotovoltaicas para gerar a mesma energia em comparação com outros tipos, e sua vida útil de mais de 30 anos.

- Células de Silício Policristalino

A principal diferença dessas células para a explicada anteriormente é o método para fundição dos cristais. No policristalino, os cristais de silício são fundidos em um bloco, desta forma preservando a formação de múltiplos cristais. Uma vez fundido, eles são cortados em blocos quadrados e, em seguida, fatiados em células assim como no monocristalino. Sua eficiência é ligeiramente mais baixa do que a célula monocristalina, sendo de 14 a 20%. Como vantagens, temos uma menor quantidade de silício residual gerada durante o processo de corte das células, seu preço, um pouco mais barato do que o painel solar de silício monocristalino, e a vida útil, que também é maior que 30 anos.

- Células de Silício Amorfo

Estas células são obtidas por meio da deposição de camadas finas de silício sobre superfícies de vidro ou metal. Sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade varia entre 5 e 7%, o que torna essa tecnologia pouco utilizada para fabricação de painéis solares.

- Células de Filmes Finos

Essas células são formadas a partir do depósito de uma ou várias camadas finas de material fotovoltaico sobre um substrato. O material fotovoltaico pode ser Silício amorfo, telureto de cádmio, cobre, índio e gálio seleneto e células solares fotovoltaicas orgânicas. Sua eficiência depende da tecnologia utilizada, ficando entre 7 e 13%. Uma das vantagens desse tipo de célula é que, ao poder depositar as camadas finas em diferentes tipos de materiais, existem hoje no

mercado painéis flexíveis, inquebráveis e mais leves, encontrando aplicações arquitetônicas diversas, como cobertura de telhados e fachadas na construção civil.

3.3.3 Principais Fundamentos

Um sistema fotovoltaico conectado à rede é formado por, além dos painéis solares, inversores, que têm como função transformar a corrente CC em CA para conexão do sistema fotovoltaico à rede. Sistemas fotovoltaicos isolados da rede necessitam, além do painel solar e dos inversores, de controladores de carga, que servem para evitar sobrecargas ou descargas exageradas na bateria, e baterias, que armazenam a energia elétrica para que o sistema possa ser utilizado quando não há sol. O esquema simplificado [13] do sistema solar fotovoltaico conectado à rede encontra-se na Figura 3.6.

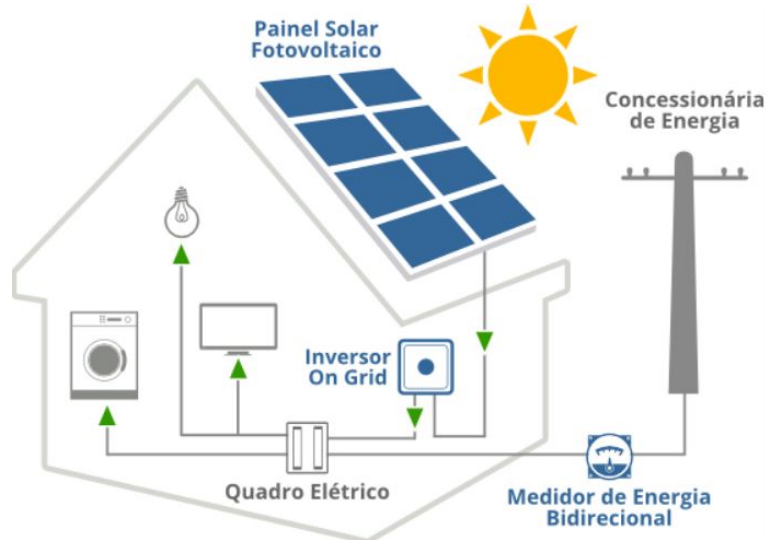


Figura 3.6: Esquema simplificado do sistema solar fotovoltaico. Fonte: [13]

Para a determinação do desempenho de um sistema fotovoltaico tem-se o conceito de produtividade do sistema Y_f , relação entre a energia de fato gerada e a potência nominal do gerador. Sua fórmula é:

$$Y_f = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P(t) dt}{P_0} = \frac{E}{P_0} \quad (3.3)$$

Em que $P(t)$ é a potência instantânea na saída do sistema, P_0 é a potência nominal da unidade geradora e E é a energia entregue pelo sistema. Sua unidade de medida é kWh/kW.

Outra grandeza para medir o desempenho do sistema é a produtividade de referência Y_r , dada por:

$$Y_r = \frac{\int_{t_1}^{t_2} H(t)dt}{H_{ref}} \quad (3.4)$$

Onde $H(t)$ é a irradiância solar incidente no plano do gerador (kW/m^2) e H_{ref} é a irradiância considerada em $1000 \text{ W}/\text{m}^2$, para um período de 24 horas. Y_r representa o número de horas equivalentes de irradiância igual a $1000 \text{ W}/\text{m}^2$, função do local, condições do tempo, orientação e inclinação do módulo.

O Desempenho Global do Sistema PR é a relação entre essas duas variáveis, Y_f e Y_r , e está apresentada na equação abaixo.

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \quad (3.5)$$

Seus valores são, geralmente, apresentados em uma base mensal ou anual e podem variar entre 0,6 e 0,8 [14].

Outro parâmetro utilizado para avaliação do desempenho de uma usina fotovoltaica é o Fator de Capacidade, que representa o nível de atividade de uma usina em um determinado período, sendo a energia de fato produzida por uma usina dividida pela produção que teria ao funcionar na sua capacidade nominal durante o mesmo período. Sua equação é dada por:

$$FC = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P(t)dt}{P_0(t_2 - t_1)} \quad (3.6)$$

3.3.4 Situação Mundial Atual

Assim como a energia eólica, a energia solar fotovoltaica está se tornando cada vez mais uma opção viável e limpa de geração de energia. Entre 2010 e 2017, a média do custo para instalação de novos projetos caiu 68% no mundo [8]. Além disso, houve o aumento da eficiência das placas solares. Na década de 50, os painéis solares possuíam uma eficiência de apenas 4,5%, correspondente a $13 \text{ Wp}/\text{m}^2$, a um custo de US\$ 1.785/Wp. Atualmente, a eficiência média global é de 15% ($143 \text{ Wp}/\text{m}^2$), a um preço entre US\$0,65/Wp e US\$1,20/Wp [15]. Até 2022 calcula-se que os preços recuem para US\$0,5/Wp a US\$1,0/Wp, quando já haverá painéis solares com eficiência de conversão de 23,5% ($348 \text{ Wp}/\text{m}^2$).

Com aumento na eficiência e queda nos custos, houve um crescimento significativo no mercado fotovoltaico. A capacidade instalada fotovoltaica global acumulada no mundo expandiu de 6,1 GW no final de 2006 para 291 GW no final de 2016 [8]. Entre 2010 e 2016 novas instalações cresceram a uma taxa de 28% anualmente, na média. Na Figura 3.7 é possível observar melhor essa informação, com o desenvolvimento da energia fotovoltaica em cada região do mundo.

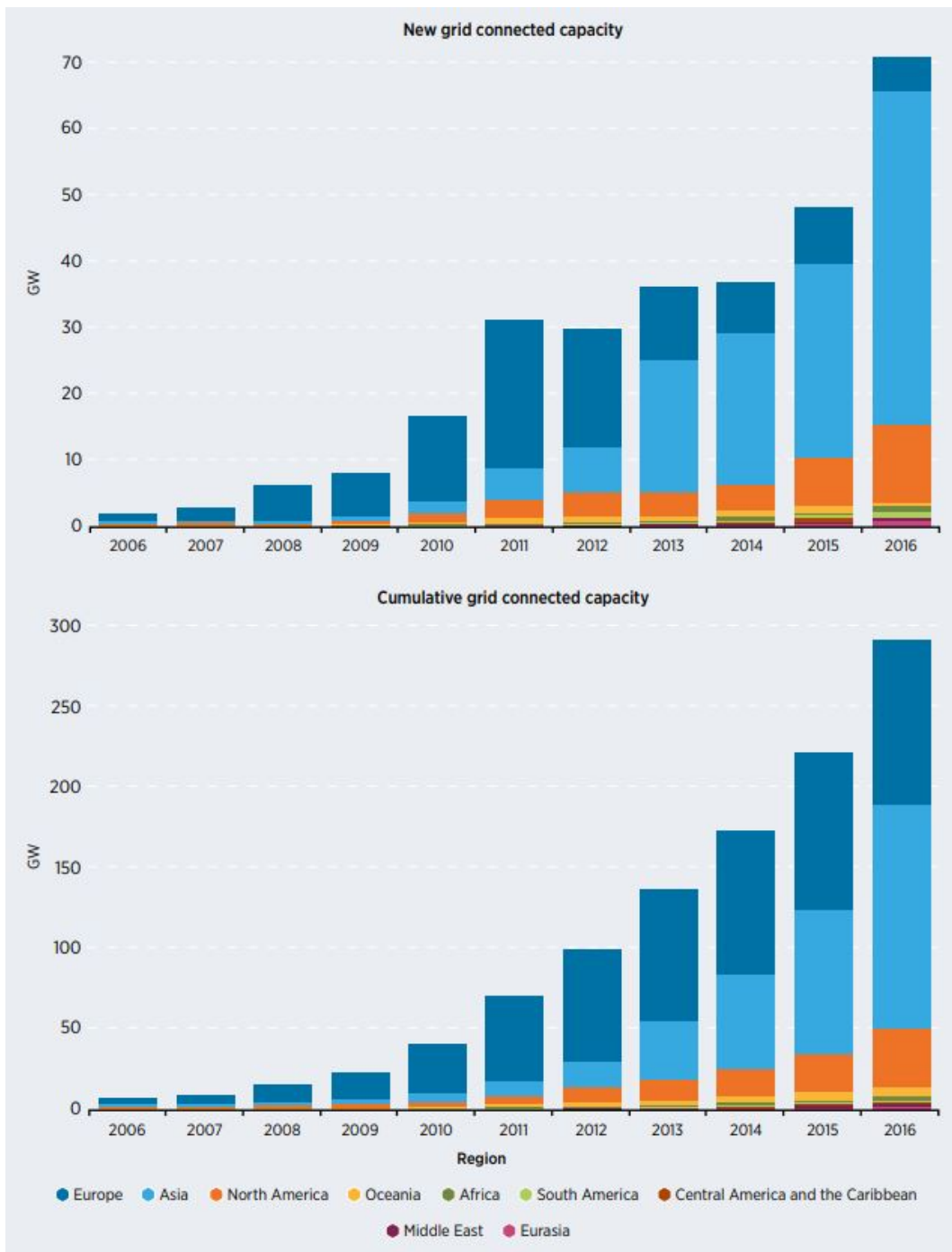


Figura 3.7: Capacidade de novas redes conectadas (alto) e capacidade acumulada de redes solares fotovoltaicas (baixo). Fonte: [8]

3.4 Energia Hidráulica

3.4.1 Aspectos Gerais

Energia hidráulica é a energia obtida a partir do aproveitamento da energia potencial da água que, ao sofrer uma queda, transforma-se em energia cinética. Essa energia cinética é responsável por mover as pás das turbinas que compõem a usina hidrelétrica, gerando, assim, energia elétrica.

O aproveitamento da energia hidráulica para geração de energia elétrica é feito através do uso de turbinas acopladas a um gerador. As turbinas hidráulicas são máquinas motrizes hidráulicas cuja função é converter a energia cinética gerada pela velocidade do escoamento da água em trabalho mecânico. Nas centrais hidrelétricas, este trabalho mecânico gerado pelas turbinas hidráulicas irá acionar os geradores elétricos, permitindo a geração de potência elétrica. Atualmente, por possuírem eficiência que chega a até 90%, as turbinas hidráulicas são a maneira mais eficiente de conversão de energia primária em energia secundária. Os principais tipos de turbinas hidráulicas são: Pelton, Francis, Hélice (também conhecida como Propeller), Kaplan, Bulbo, Deriaz, e Fluxo Cruzado. As turbinas possuem diversas formas e tamanhos, e o uso de cada tipo depende de fatores da usina, geralmente sendo a altura da queda d'água determinante na escolha da turbina a ser utilizada.

Uma usina hidrelétrica pode ser classificada segundo os seguintes parâmetros: potência instalada, tipo de queda d'água e tipo de reservatório. Quanto à potência instalada, ela pode ser classificada em Usina Hidrelétrica de Energia (UHE), quando possui potência maior que 30 MW, Pequena Central Hidrelétrica (PCH), quando possui potência maior que 1 MW e menor que 30 MW, e Central Geradora Hidrelétrica (CGH), usinas com potência de até 1 MW. No caso da geração distribuída, o empreendimento hidrelétrico deve ser ou uma PCH ou uma CGH, segundo o Decreto nº 5163 de 30 de Julho de 2004 [3].

Quanto ao tipo de reservatório, ela pode ser a fio d'água, de acumulação e reversível. Usina a fio d'água é aquela que não possui reservatório significativo, geralmente possuindo reservatório suficiente apenas para regularização diária ou semanal. Ela opera com queda constante e não há controle da vazão. Já a usina de acumulação ou armazenamento é uma usina de grande porte e possui grande reservatório de água, localizada geralmente em locais de alta queda. Ela tem como vantagem a possibilidade de armazenar água para geração de energia em épocas de estiagem, propiciando a estabilidade do sistema elétrico. Estão geralmente localizadas a montante das demais centrais hidrelétricas, e por isso regulam a vazão de água que irá passar nas outras usinas. O último tipo de usina, a reversível, pode tanto gerar energia elétrica como consumir. Ela gera energia elétrica a partir de queda d'água entre dois reservatórios e consome energia elétrica ao bombear água de um reser-

vatório a jusante para outro a montante, permitindo, assim, o armazenamento de energia sob a forma de energia potencial. Na geração distribuída, por demandar menor tempo de construção e possui baixo impacto ambiental, a usina a fio d'água é a mais utilizada.

A queda d'água pode ser classificada em alta, média ou baixa queda. Os valores que classificam uma usina entre um tipo ou outro não são muito claros, dependendo da fonte de pesquisa. Segundo o Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas – CERPCH, da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, uma instalação de até 15 m de altura de queda é considerada baixa queda, enquanto instalações com alturas superiores a 150 m são consideradas de alta queda e instalações com altura entre esses dois valores são consideradas de média queda [16].

3.4.2 Principais Fundamentos

Na Figura 3.8 é possível ver o esquema de uma usina hidrelétrica [17].

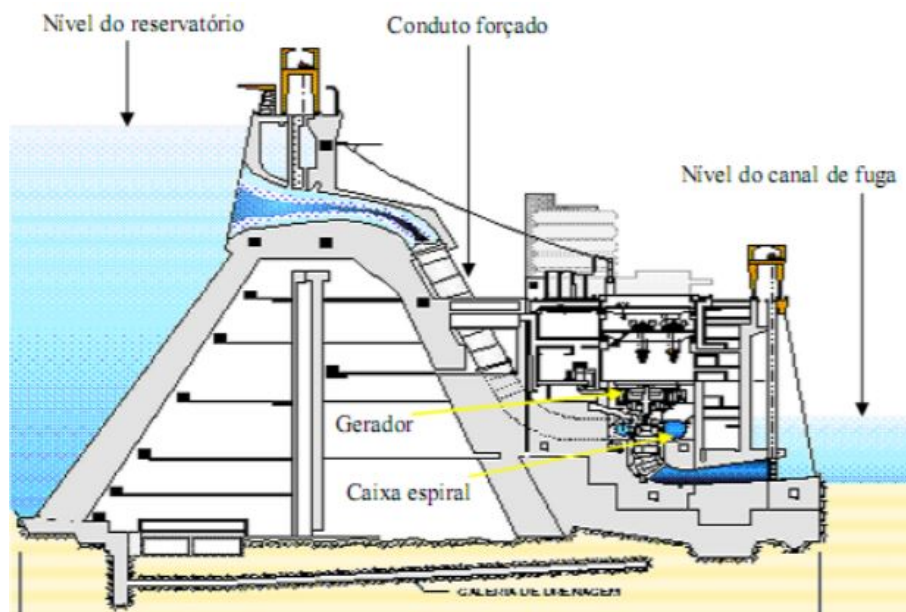


Figura 3.8: Figura esquemática de uma usina hidrelétrica. Fonte: [17]

Para definir a potência gerada por uma usina hidrelétrica, tem-se a seguinte equação:

$$P = g\rho 10^{-6} \eta_{tur} \eta_{ger} h_t q \quad (3.7)$$

Sendo:

P a potência gerada (MW);

g a aceleração da gravidade (m/s^2);
 ρ o peso específico da água (kg/m^3);
 η_{tur} o rendimento da turbina (%);
 η_{ger} o rendimento do gerador (%);
 h_t a altura de queda líquida (m);
 q a vazão turbinada (m^3/s).

A altura de queda líquida é dada pela diferença entre a cota do nível do reservatório e do canal de fuga, subtraído disso a perda hidráulica, dada pela equação:

$$h_p = k * q^2 \quad (3.8)$$

Sendo k a constante característica do conduto forçado (s^2/m^5).

O balanço hídrico é definido como a contabilização das entradas e saídas de água de um sistema, e é dado pela equação:

$$v_{t+1} = v_t + a_t - [s_t + w_t + u_t] \quad (3.9)$$

Sendo:

t o intervalo de tempo (valores discretos);
 a_t o volume da afluência lateral chegando à usina no estágio t (m^3);
 v_t o volume armazenado no reservatório no início do intervalo t (m^3);
 w_t o volume perdido por evaporação ou infiltração no estágio t (m^3);
 s_t o volume vertido no estágio t (m^3);
 u_t o volume turbinado no estágio t (m^3).

3.4.3 Situação Mundial Atual

A usina hidrelétrica ainda é a tecnologia mais utilizada para geração de energia elétrica no mundo. A capacidade instalada total das hidrelétricas foi de 1.121 GW no final de 2016 [8], apesar de sua participação na capacidade instalada total mundial estar em declínio. Em 2010, ela representava 75% da capacidade instalada total de energia renovável no mundo, enquanto em 2016, correspondia a apenas 50% desse total. Em termos de geração, em 2010, 81% da eletricidade gerada vinha de usinas hidrelétricas, porém em 2016, esse valor passou a ser 70%.

A precificação de instalação de uma usina hidrelétrica é muito variável, dependendo do tamanho da hidrelétrica e do tipo de turbina a ser utilizada. Por esse motivo, o custo de instalação total para projetos hidrelétricos no mundo normalmente varia entre US\$ 500/kW e US\$ 4500/kW, existindo projetos fora dessa faixa

de preço [8]. Esse valor varia também de região para região do mundo, como pode ser visto na Figura 3.9.

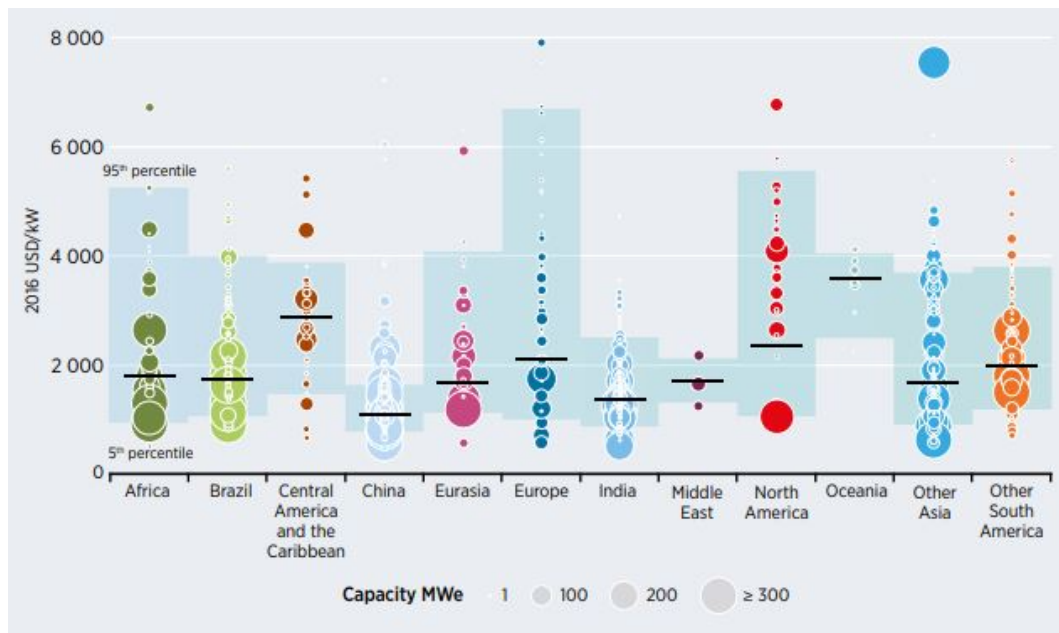


Figura 3.9: Custo total de instalação de uma usina hidrelétrica, por país/região, em 2016. Fonte: [8]

Como pode ser observado no gráfico, no Brasil, quanto menor a capacidade da usina a ser construída, maior é o seu custo médio de construção. Apesar dessa desvantagem das PCH's e CGH's em relação às UHE's, os fatores ambientais, o tempo de implantação e a possibilidade de autonomia do consumidor acabam se sobressaindo e tornam essas usinas uma alternativa de geração de energia.

Capítulo 4

A atual Geração Distribuída no Brasil

4.1 Dados atuais de Micro e Minigeração Distribuída

O Brasil possui, atualmente, 31.632 usinas em operação na modalidade de micro e minigeração distribuída que permitem a compensação de energia injetada na rede, com um total de 44.728 unidades consumidoras que recebem os créditos da energia excedente [18]. Esses valores, separados por tipo de geração, podem ser vistos na Tabela 4.1.

Unidades Consumidoras com Geração Distribuída			
Tipo	Quantidade	UCs que recebem os créditos	Potência Instalada (kW)
CGH	49	6.856	43.929,98
EOL	56	99	10.311,90
UFV	31.435	37.539	296.869,40
UTE	91	234	29.742,08
Total	31.631	44.728	380.853,36

Tabela 4.1: Unidades Consumidoras com Geração Distribuída. Fonte: [18]

A potência total instalada é de 380 MW, o que corresponde a 0,25% da potência total instalada no Brasil. Apesar do valor pouco significativo, a micro e minigeração distribuída estão em acelerado crescimento no país, como pode ser evidenciado nos gráficos das Figuras 4.1 e 4.2 [19], que mostram o número de micro e minigeraores distribuídos instalados desde 2015, com as projeções feitas para esse crescimento, e a potência instalada desde 2015, também com as projeções feitas anteriormente. Isso mostra que há uma tendência para maior importância da geração distribuída no país, com a potência instalada em 2017 superando as projeções feitas.

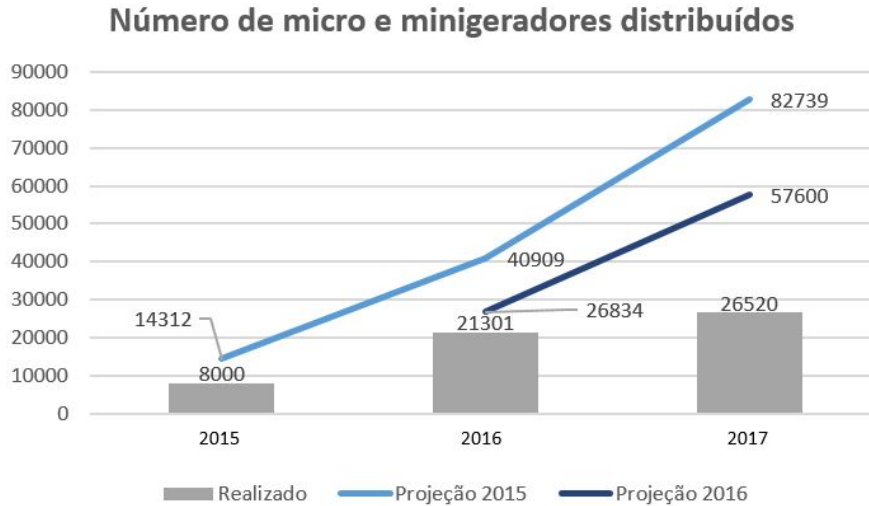


Figura 4.1: Número de micro e minigeradores distribuídos. Fonte: [19]

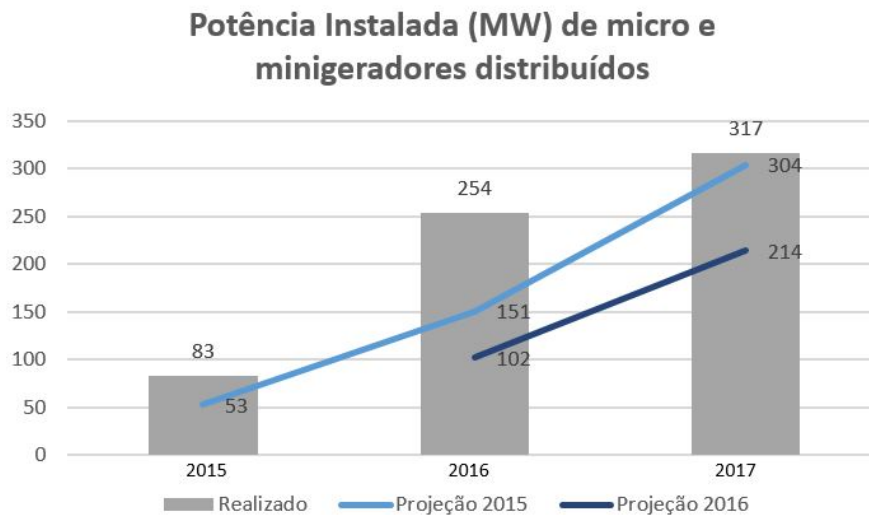


Figura 4.2: Potência instalada (MW) de micro e minigeradores distribuídos. Fonte: [19]

Um dos incentivos promovidos pelo governo para uma maior adoção da Geração Distribuída pelos consumidores, com ênfase na geração solar fotovoltaica, é o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica – ProGD, criado pelo Ministério de Minas e Energia em 2015. Com previsão de investimentos de pouco mais de R\$ 100 bilhões, suas principais metas são de reduzir as emissões de CO₂ em relação aos níveis de 2005 em 43% até 2030 e ter 2,7 milhões de unidades consumidoras gerando sua própria energia de forma limpa e renovável, alcançando 23% de energia renovável (além da energia hídrica) no fornecimento de energia elétrica [20].

Para atingir essas metas, o Programa incentiva a atuação de agentes vendedores

de energia de empreendimentos de geração distribuída, prevendo realizar estudos para permitir a venda dessa energia no mercado livre de energia, atacando dessa forma a barreira de custo elevado. Uma das ações é também a criação e expansão de linhas de crédito para Geração Distribuída. Para combater a barreira de questão regulatória o ProGD instituiu um grupo de trabalho com o MME, Aneel, EPE, Cepel e CCEE para acompanhar as ações e propor aprimoramentos legais, regulatórios e tributários para o estímulo à geração distribuída.

Outros incentivos incluem a isenção do PIS e COFINS pelo Governo Federal, pela Lei n 13.169, a dedução de imposto de renda por amortização de equipamentos e as diversas linhas de financiamento disponíveis no mercado [21]. Cabe ressaltar que as linhas de financiamento até então eram, na sua maioria, para projetos de pessoas jurídicas. Recentemente, foi anunciado pelo BNDES linha de financiamento para projetos de pessoas físicas [22], o que impulsiona ainda mais o crescimento da Micro e minigeração Distribuída no país.

4.2 Energia Eólica

A geração distribuída eólica é a modalidade de geração menos expressiva atualmente no Brasil, com apenas 56 usinas eólicas instaladas e um total de 10,31 MW de potência instalada. Seus consumidores são, na sua maioria, residenciais e comerciais, como pode ser visto no gráfico abaixo.

Geradores Eólicos por classe de consumo

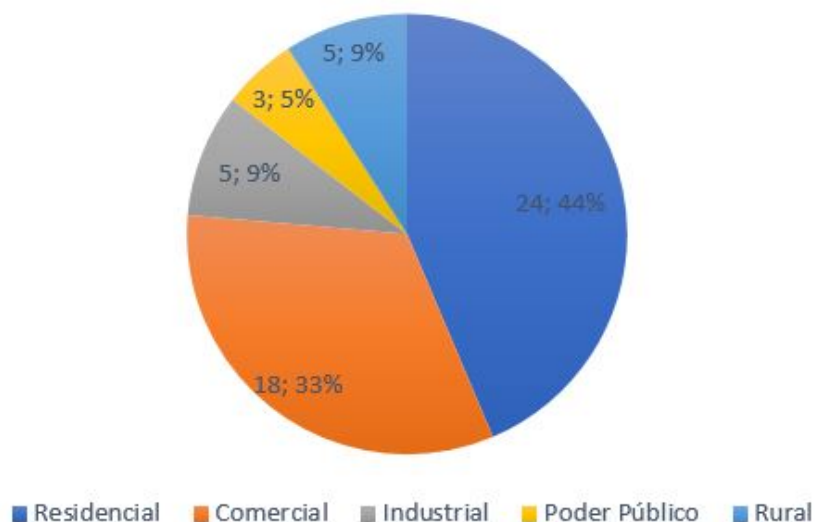


Figura 4.3: Geradores Eólicos por classe de consumo. Fonte: [18]

Alguns fatores a tornam menos atraente do que outros tipos de geração, como o fato de que, para melhor aproveitamento da turbina eólica, é necessário captar o

vento a uma velocidade entre 7 m/s e 15 m/s, velocidade essa atingida apenas em alguns locais do Brasil [23], como pode ser visto nos mapas da Figura 4.4, com a velocidade média do vento por estação.

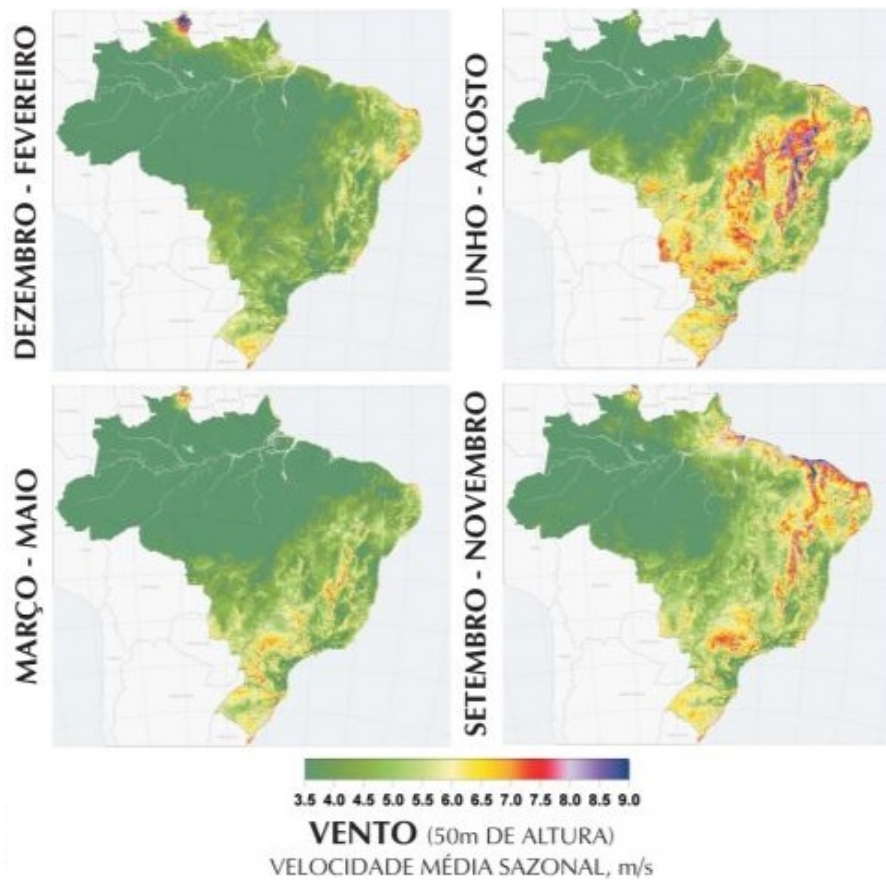


Figura 4.4: Velocidade do vento média sazonal no Brasil (m/s). Fonte: [23]

Além disso, sistemas eólicos de pequeno porte estão mais próximos do solo do que grandes aerogeradores, tornando a captação de ventos a uma velocidade média propícia para a geração de energia ainda mais difícil. Nas menores altitudes, ela é afetada pela fricção do vento com a superfície terrestre, enquanto bosques e centros urbanos podem abrandar o vento e torná-lo menos constante. Torres de minigeradores eólicos têm, normalmente, entre 10 e 40 metros de altura, uma altura consideravelmente mais baixa que as torres dos grandes geradores eólicos, que têm entre 50 e 140 metros de altura.

Ao realizar a instalação de um minigerador eólico, recomenda-se que ele esteja a pelo menos 10 metros a mais de altura que a edificação mais alta dentro de um raio de 150 metros, já que altas construções no entorno podem tornar-se obstáculos que influenciam no comportamento dos ventos [24]. Isso torna a instalação de uma usina eólica em grandes centros urbanos de difícil execução, uma vez que os altos prédios podem ser um empecilho no melhor aproveitamento do gerador eólico. Uma solução existente é a instalação do aerogerador no telhado de edifícios, desde que

seja feito um laudo estrutural antes.

Outro motivo que torna os minigeradores eólicos impopulares é o ruído feito por eles e que podem gerar incômodo. O nível de ruído de um aerogerador de pequeno porte pode, em alguns momentos, atingir valores superiores a 65 dB [25], dependendo da velocidade do vento, podendo prejudicar o sono de moradores no entorno e dores de cabeça. Além disso, não é só o ruído das turbinas eólicas que aumenta com o aumento da velocidade do vento. O ruído residual, devido à interação do vento com a vegetação, animais, obstáculos ou a qualquer outra fonte sonora também sofre um incremento, podendo ser quase tão rumoroso quanto a turbina eólica.

4.3 Energia Hidráulica

Na modalidade de micro e mini GD, a energia hidráulica pode estar presente na forma de PCH (Pequena Central Hidrelétrica) e CGH (Central Geradora Hidráulica), usinas que normalmente operam a fio d'água ou que possuem reservatório com, no máximo, 3 km². Atualmente há 49 usinas hidrelétricas instaladas no Brasil na micro e minigeração distribuída, com potência instalada de 43,93 MW. Suas unidades consumidoras são, em sua maioria, Comerciais e Rurais, como pode ser visto na Figura 4.5.

Geradores hidráulicos por classe de consumo

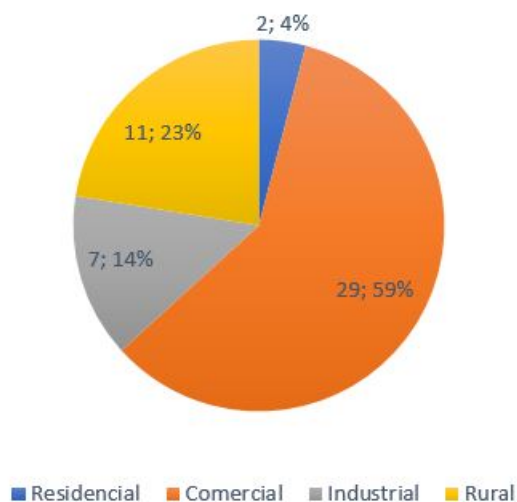


Figura 4.5: Geradores hidráulicos por classe de consumo. Fonte: [18]

É importante mencionar que, de acordo com dados da ANEEL, mais da metade dos empreendimentos desse tipo encontram-se na modalidade de autoconsumo remoto. Autoconsumo remoto permite que a geração de energia ocorra em local diferente de onde é consumido, desde que os dois estejam conectados na mesma rede

de distribuição, e desde que os medidores de consumo e geração estejam cadastrados no mesmo CPF e CNPJ. Isso permite que empresas gerem energia em uma propriedade e utilizem essa energia em diferentes pontos de consumo, além de receber os créditos pela energia injetada na rede nesses diferentes pontos de consumo. De fato, dos 29 consumidores da classe comercial, 21 utilizam essa modalidade.

Uma das barreiras para a maior popularização das hidrelétricas na Geração Distribuída é o custo de instalação a ela associado. Como já mostrado no capítulo anterior na Figura 3.9, quanto menor a potência instalada da usina, maior será o custo de instalação por kWh. A tributação sobre os equipamentos da construção é um fator delimitante para uma maior propagação das PCH's e CGH's entre o típico investidor nessa fonte, as pequenas e médias empresas, em que a taxa é de 27,25% na produção (e de 35,55% quando da importação) mais 18,05% na comercialização [26].

Apesar do alto investimento inicial necessário, o valor para a energia dessas usinas por MWh produzido e efetivamente recebido pelos geradores na média de 2010 a 2017 é de R\$ 225/MWh. Perde apenas para as grandes UHEs, com capacidade acima de 50 MW e que na média de 2005 a 2017 ficou em R\$ 143/MWh [26]. Isso mostra que, apesar do alto investimento inicial, a longo prazo as PCH's e CGH's são uma ótima opção para quem possui terreno com essa possibilidade de construção.

4.4 Energia Térmica

Atualmente, existem 91 usinas termelétricas em funcionamento na minigeração distribuída, com 235 unidades consumidoras recebendo os créditos dessa geração e potência instalada total de 29,82 MW. A fonte de energia primária utilizada é, em sua grande maioria, oriunda da biomassa, como pode ser observado na Tabela 4.2.

Fonte	Número de geradores por fonte
Biogás - Resíduos Animais	57
Biogás-Agroindustriais	14
Biogás - Resíduos Sólidos Urbanos	8
Resíduos Florestais	4
Casca de Arroz	4
Gás Natural	2
Biogás - Floresta	2
Gás de Alto Forno - Biomassa	1

Tabela 4.2: Fontes de energia primária na Biomassa . Fonte: [18]

As usinas termelétricas são utilizadas na geração descentralizada, geralmente, na forma de cogeração, em que resíduos de processos industriais são utilizados para a geração de eletricidade e calor. Assim, além da possibilidade de gerar menos

resíduos, a cogeração viabiliza também o aproveitamento do calor gerado na usina termelétrica para outros processos produtivos, podendo este calor estar na forma de vapor, água quente ou fria. A vantagem desta solução é que o consumidor economiza o combustível que necessitaria para produzir o calor do processo, elevando a eficiência energética do sistema.

O consumo simultâneo de energia térmica (levando em conta as suas várias utilizações em vapor, água quente e água gelada) e de energia eletromecânica (eletricidade e acionamentos mecânicos), pode ser encontrado em todos os segmentos – residencial, comercial, rural e industrial. No entanto, no Brasil, o que se observa na geração distribuída é um maior aproveitamento da cogeração no meio rural, como pode ser visto na Figura 4.6.

Geradores térmicos por classe de consumo

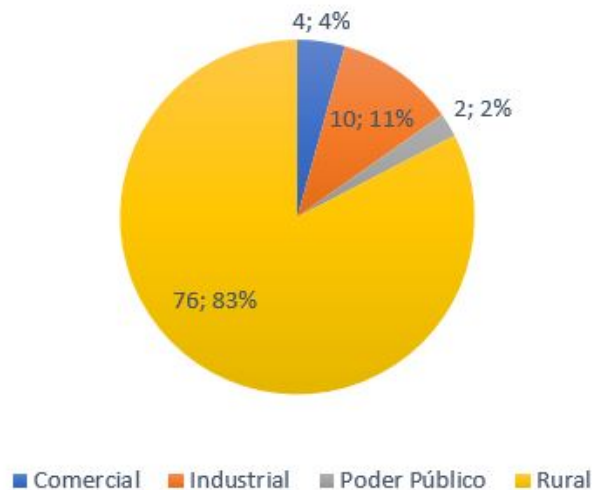


Figura 4.6: Geradores térmicos por classe de consumo. Fonte: [18]

4.5 Energia Solar Fotovoltaica

Com uma potência total instalada que ultrapassa 296 MW, a usina solar fotovoltaica é, atualmente, a modalidade mais utilizada na micro e minigeração distribuída, com 31.435 geradores atendendo a 37.539 unidades consumidoras. A maioria de seus consumidores são residenciais, com destaque também para as unidades comerciais, como pode ser visto na Figura 4.7.

Geradores fotovoltaicos por classe de consumo

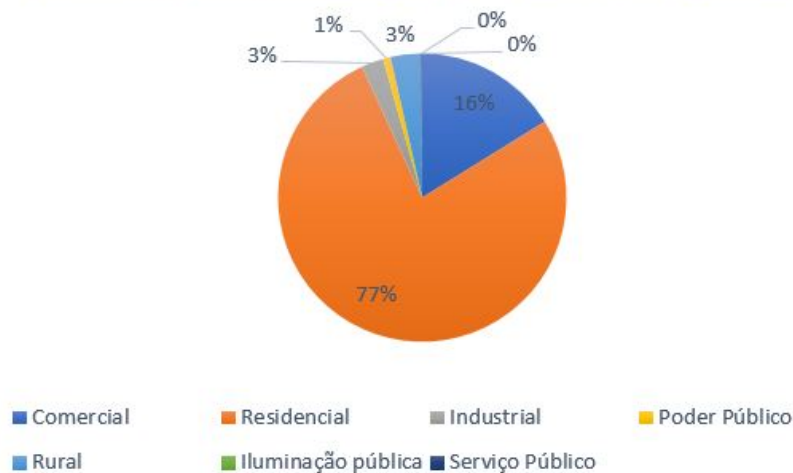


Figura 4.7: Geradores fotovoltaicos por classe de consumo. Fonte: [18]

Alguns fatores a tornam a modalidade mais popular no Brasil, como a modularidade dos painéis solares, podendo atender a diferentes perfis de consumidores. Além disso, para a instalação de sistemas de microgeração fotovoltaicos conectados à rede não há necessidade de grandes áreas específicas ou grandes obras de adequação, visto que os sistemas são instalados na própria área construída como, por exemplo, em telhados, locais não utilizados normalmente pelo consumidor.

Outro fator é a irradiação solar disponível no Brasil, propícia para a utilização da usina solar fotovoltaica como fonte de energia elétrica. A radiação solar média diária no Brasil varia entre 4,27 e 6,1 kWh/m²/dia. A região do país com pior nível de radiação está entre 4,7 e 4,85 kWh/m²/dia (Figura 4.8). Na Alemanha, líder mundial em geração solar fotovoltaica, por exemplo, a radiação média diária não ultrapassa 3,4 kWh/m²/dia [27].

O custo da energia solar fotovoltaica depende de três fatores: irradiação solar disponível, desempenho e custo dos sistemas fotovoltaicos. Como já foi visto, o país é beneficiado pela farta irradiação solar. Quanto ao custo, apesar do custo de instalação considerado alto, variando conforme a potência instalada, em dois anos houve queda de 50% e a tendência é que continue caindo [28]. Graças ao aumento nas tarifas de energia elétrica no país, hoje, em cerca de 80% do território nacional, já ocorre a chamada paridade tarifária, em que os custos entre a energia elétrica gerada por sistemas fotovoltaicos é igual à tarifa de energia elétrica convencional. Isso torna a adoção desse tipo de geração ainda mais atraente, pois o prosumidor pode eliminar o custo mensal de energia elétrica junto à concessionária e pagar apenas as taxas de disponibilidade da rede de distribuição e taxa de iluminação pública ou ainda reduzir um percentual da fatura mensal de energia.

O desempenho do sistema fotovoltaico é dependente da radiação solar incidente

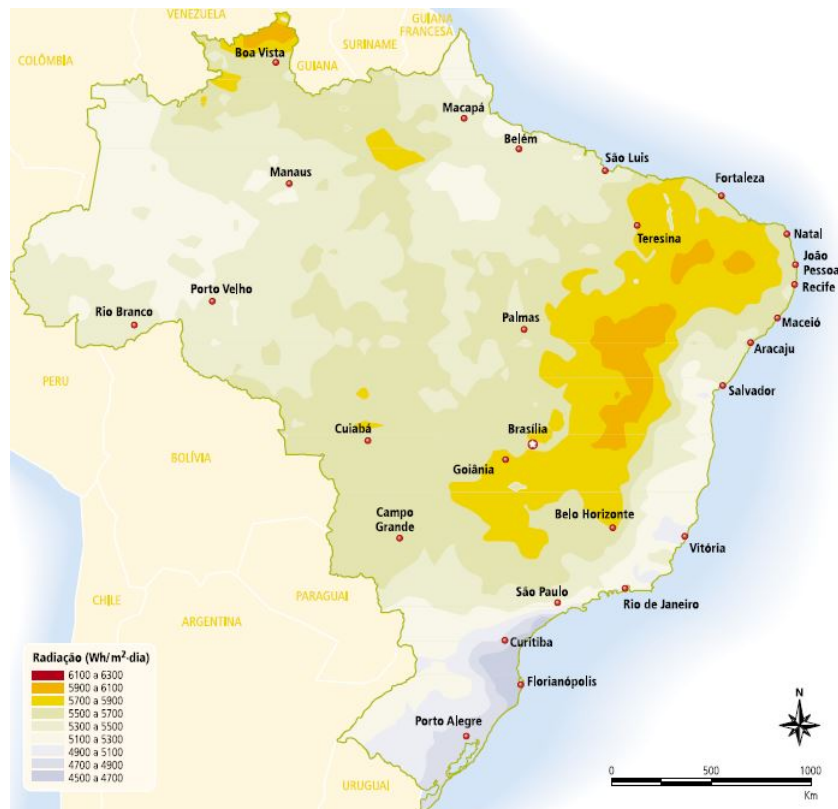


Figura 4.8: Radiação solar global diária - média anual típica (Wh/m².dia). Fonte: [11]

no plano dos módulos, da temperatura de operação dos módulos, da curva de desempenho do inversor e das perdas do sistema como as registradas na fiação e conexões, entre outros. Como já falado no capítulo anterior, dois parâmetros para avaliar o desempenho do sistema solar fotovoltaico são o Desempenho Global do Sistema e o Fator de Capacidade. Em 2017 foi feito um estudo [29] sobre o desempenho de dez cidades brasileiras em diferentes pontos do país, com inclinação igual à latitude local e ângulo azimutal 0°. Como pode ser visto na Tabela 4.3, as cidades brasileiras estudadas possuem uma alta taxa de desempenho, entre 0,73 e 0,78, tornando o sistema solar fotovoltaico ainda mais atrativo.

Cidade	Ener. Anual (kWh)	Produt. (kWh/kWp)	PR	FC (%)
Santa Maria - RS	2047	1362	0,78	15,5
Curitiba - PR	1920	1277	0,78	14,6
São Paulo - SP	2079	1383	0,77	15,8
Rio de Janeiro - RJ	2276	1514	0,77	17,3
Campo Grande - MS	2364	1573	0,77	18,0
Belo Horizonte - MG	2341	1558	0,76	17,8
Brasília - DF	2379	1583	0,77	18,1
Bom Jesus da Lapa - BA	2463	1639	0,74	18,7
Fortaleza - CE	2326	1548	0,77	17,7
Manaus - AM	1933	1286	0,73	14,7

Tabela 4.3: Parâmetros de desempenho de um sistema fotovoltaico de referência de 1500 W_p. Fonte: [29]

Capítulo 5

Perspectivas da Geração Distribuída no Brasil

Ao passo que a Geração Distribuída se torna cada vez mais uma opção de geração de energia no Brasil, sua introdução no Planejamento Energético é fundamental. A expansão dos parques industriais e as questões ambientais são fatores decisivos para a ampliação da GD de grande escala, enquanto a renovação da infraestrutura urbana aponta uma maior penetração da GD de pequena escala. Por apresentar perfis de consumo diferentes, como os horários de maior consumo serem diferentes, o planejamento da GD de pequena e média escala é feito em separado da GD de grande escala. Para a elaboração deste capítulo, foram utilizados três estudos realizados pela EPE para a projeção da Geração Distribuída no Brasil: o Plano Nacional de Energia 2050 [6], com as previsões a longo prazo, até 2050, da pequena, média e larga escala, o Plano Decenal de Expansão de Energia 2026 [30], com as previsões a médio prazo, até 2026, da pequena escala, e o Plano Decenal de Expansão de Energia 2024 [31], com as previsões até 2024 da larga escala.

5.1 Pequena e Média Escala

A Geração Distribuída de pequena e média escala tem como característica a dispersão e variedade de interesses dos agentes, dependendo de cada realidade local. Por isso, ao realizar o planejamento energético desse tipo de GD, deve-se considerar as condições para que esse investimento aconteça de maneira difundida e seja uma opção viável para os agentes. Essa análise das condições de contorno para o caso da pequena e média escala é considerada mais importante do que ao realizar o planejamento de grande escala e da geração centralizada.

As condições são essenciais para que haja uma maior aceitação da geração distribuída como um investimento confiável. Como exemplo dessas condições, temos

a disponibilidade de fornecedores de serviços e equipamentos, o acesso aos financiamentos, programas de disseminação de informação e a utilização da geração distribuída pelo setor público. No Planejamento Nacional de Energia 2050 desenvolvido pela EPE [6] considerou-se, para a previsão da GD de pequena e média escala no Brasil até 2050, um cenário com condições que estimulam o investimento disperso dessa modalidade de geração, como a renovação da infraestrutura, a propagação do mercado de serviços de energia e a mudança de paradigma dos agentes de distribuição.

5.1.1 Geração Distribuída Fotovoltaica a longo prazo

Uma das principais tecnologias consideradas na GD de pequena e média escala é a solar fotovoltaica. Por oferecer grande modularidade e pela redução do custo, essa tecnologia deve ser a principal alternativa para o consumidor que queira gerar sua própria energia, em especial na escala de micro geração para residências e comércios, no horizonte de 2050.

A metodologia empregada para a previsão da inserção da GD fotovoltaica de pequeno porte no Brasil, em estudo desenvolvido pela EPE [6], visa essa inserção sob o ponto de vista do consumidor final. Os motivos considerados para a adoção dessa tecnologia pelos consumidores são diversos, como custos, conhecimentos da tecnologia e preocupação ambiental, sendo o custo o principal deles. Sendo assim, o modelo de previsão parte da avaliação do retorno financeiro ao longo da vida útil dos sistemas fotovoltaicos em conjunto com a avaliação do mercado potencial de adotantes. Essa metodologia foi empregada para todos os setores analisados: residencial, industrial, comercial e poder público.

Previsão de custo

Como o custo é crucial para o consumidor ao optar por gerar sua própria energia, é necessária a previsão do custo da tecnologia fotovoltaica para uma correta previsão da inserção dessa tecnologia na GD no Brasil. Para isso, foi utilizado como referência pela EPE as projeções de redução percentual de custos sobre os custos de instalação no Brasil: R\$7,00/Wp para o setor residencial, R\$6,50/Wp para o comercial e R\$6,00 para o industrial [32]. A perspectiva de custo ao longo das décadas, com previsão até 2050, encontra-se na Tabela 5.1.

Segundo essa perspectiva, até 2050 estima-se que todos os setores da sociedade atinjam, aproximadamente, o mesmo patamar de custo para os sistemas fotovoltaicos.

	2013	2020	2030	2040	2050
Residencial	7,0	4,4	3,2	2,7	2,3
Comercial	6,5	4,2	3,0	2,5	2,1
Industrial	6,0	3,4	2,7	2,3	2,0

Tabela 5.1: Perspectiva de redução de custos dos sistemas fotovoltaicos (R\$/Wp).
Fonte: [6]

Premissas

Para caracterização do mercado potencial fotovoltaico residencial a longo prazo, até 2050, foi considerado que os sistemas fotovoltaicos irão se tornar mais acessíveis, não só pelo barateamento dos sistemas (como já mostrado acima), mas também pela maior facilidade de financiamento e a difusão de diferentes modelos de negócios, como o *leasing* (aluguel de um sistema fotovoltaico pago mensalmente) e as compras em grupo. Sendo assim, unidades consumidoras com consumo superior a 100 kWh/mês foram consideradas como possíveis adotantes do sistema no estudo a longo prazo. Além disso, foi estimado que no longo prazo os sistemas FV deixem de ser adotados apenas pela parcela inovadora da sociedade e atinja também as parcelas consideradas “maioria inicial” e “maioria tardia”. Diante dessas premissas, foi adotado um fator médio de adesão de 40% em 2050. Na Tabela 5.2 tem-se a potência típica instalada para cada faixa de consumo.

Faixa de consumo (kWh/mês)	Potência típica (kWp)
100-200	1
200-300	1,5
300-400	2
400-500	3
500-1000	4
>1000	10

Tabela 5.2: Potência típica por faixa de consumo. Fonte: [6]

As premissas dos setores industrial, comercial e poder público são similares às premissas do setor residencial. No caso do comércio e da indústria, deve-se adicionar uma motivação a mais para a adoção dos sistemas fotovoltaicos distribuídos: a preocupação da imagem da sua empresa perante seu público. No caso do setor público, considera-se um setor estratégico para a difusão da GD no país, pois sua adesão serve de exemplo aos outros setores da sociedade. Considerando essas premissas, prevê-se que, em 2050, teremos os seguintes percentuais de atendimento da demanda via GD fotovoltaica: 9% comercial, 3,5% industrial e 10% no poder público.

É importante mencionar que, para o horizonte a longo prazo, foram adotadas duas previsões: a Referência e a Novas Políticas. Considera-se que nesta última as

premissas mencionadas anteriormente sejam evidenciadas em maior escala, levando a um maior estímulo de adesão dos usuários. Nessa última previsão, previu-se os seguintes percentuais de atendimento de demanda via GD fotovoltaica: 50% residencial, 7% industrial, 14% comercial e 18% do poder público.

Previsões

A previsão da EPE de longo prazo, tendo as premissas descritas na seção anterior como base e utilizando o modelo matemático de Bass, apresenta-se nos gráficos abaixo, figuras 5.1 e 5.2, e na Tabela 5.3.

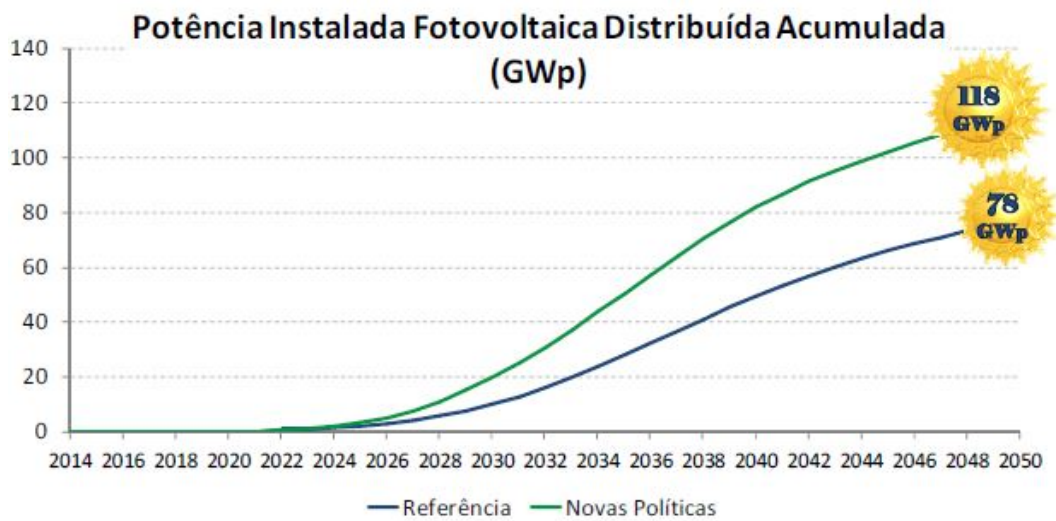


Figura 5.1: Previsão da potência instalada fotovoltaica distribuída acumulada. Fonte: [6]

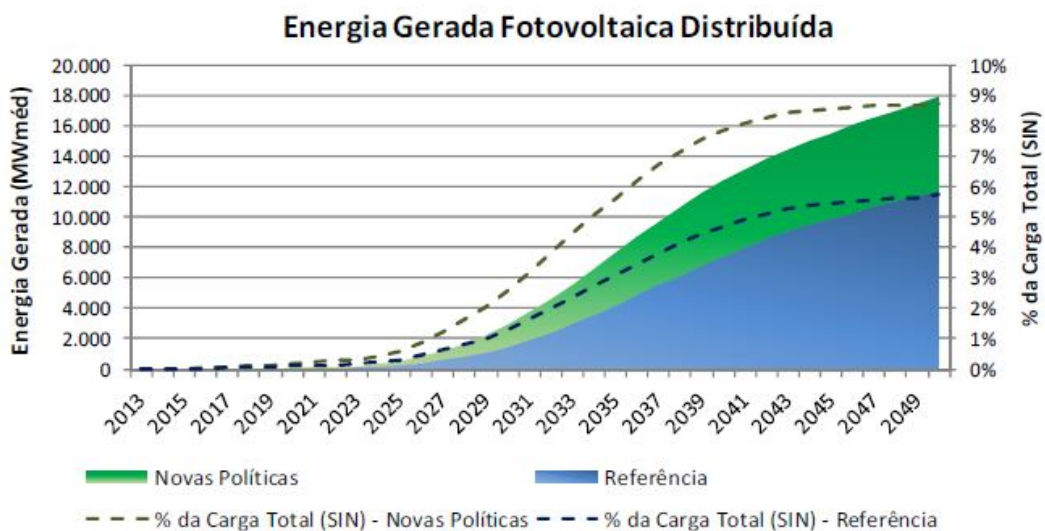


Figura 5.2: Previsão da energia gerada fotovoltaica distribuída. Fonte: [6]

	Referência				Novas Políticas			
	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
Potência Instalada (GWp)	0,5	10	50	78	1	20	82	118
Energia Gerada (MWméd)	78	1.523	7.466	11.797	153	3.001	12.511	18.029
% da Carga Total (SIN)	0,1%	1,3%	4,7%	5,7%	0,2%	2,6%	7,9%	8,7%

Tabela 5.3: Projeções da geração distribuída fotovoltaica. Fonte: [6]

Como é possível perceber pelas projeções, a geração distribuída fotovoltaica terá um salto entre 2030 e 2040, quando passará de 1,3% de atendimento da carga do SIN em 2030 para 4,7% em 2040. Espera-se que a geração distribuída fotovoltaica desempenhe, nas próximas décadas, papel fundamental no atendimento à demanda de energia elétrica, gerando cerca de 12 GWméd em 2050. Com isso, atenderá cerca de 5,7% de toda a carga do SIN no período final da análise, usando a projeção de referência. Esse valor está de acordo com a previsão feita pela IEA [33], que prevê que, em 2050, a geração distribuída fotovoltaica atenderá 6% da demanda de energia elétrica mundial.

Caso haja maior comprometimento do governo para a criação de mecanismos que visam a adoção da geração distribuída pela população, é possível atender uma porcentagem ainda maior da carga do SIN, chegando a quase 9% da carga total do SIN, como visto na projeção Novas Políticas.

5.1.2 Geração Distribuída de Biogás a longo prazo

A geração distribuída de biogás utiliza a biomassa residual, podendo ser esta biomassa residual agrícola, biomassa residual da pecuária, biomassa residual urbana e a vinhaça (resíduo da produção de etanol). O estudo feito para a previsão de Geração Distribuída de Biogás no Brasil a longo prazo é, assim como na GD Fotovoltaica, o Plano Nacional de Energia 2050. Estima-se um aumento no potencial energético das biomassas de 200 milhões de tep em 2013 para 540 milhões de tep em 2050 no Brasil [6]. Desse total, a biomassa residual passará a corresponder a 61% no final do período analisado. Apesar desse alto potencial, devido a diversas barreiras não relacionadas à economia, somente 24% dele é viável economicamente.

Premissas

A principal premissa assumida para a inserção da GD de Biogás no Brasil é que esse potencial energético de 24% seja alcançado apenas no final do período estudado. Porém, devido à competitividade entre os usos do biogás, para geração de eletricidade ou produção de metano, desses 24% apenas 30% dessa penetração será utilizada para a geração de energia no contexto da Geração Distribuída, ou

seja, do potencial de produção de biogás, apenas 7% será considerado para geração de eletricidade na GD em 2050.

A segunda premissa estipulada na Plano Nacional de Energia 2050 é que, caso haja um bom desenvolvimento da produção de biogás, as barreiras não-econômicas serão reduzidas gradualmente até 2030, quando haverá a expansão da produção de biogás, aumentando a implantação de projetos de geração de energia através do biogás.

Assim como no estudo feito para a previsão da GD Fotovoltaica até 2050, para a previsão da GD utilizando biogás também foi elaborada uma segunda projeção, em que supõe-se um cenário mais positivo para a penetração dessa modalidade de geração no país, contando que a zona de competitividade do biogás dobrará como consequência da maior preocupação ambiental e de medidas de incentivo à produção do energético. Essa segunda projeção é chamada de “Novas Políticas”.

Previsões

Dada as premissas consideradas anteriormente, foram feitas as projeções da inserção da GD a biogás no país até 2050 [6]. Para essas previsões, o biogás utilizado para geração de eletricidade e o potencial de biogás total foram convertidos para milhões de m³/dia de biometano. As previsões encontram-se nas Figuras 5.3 e 5.4.

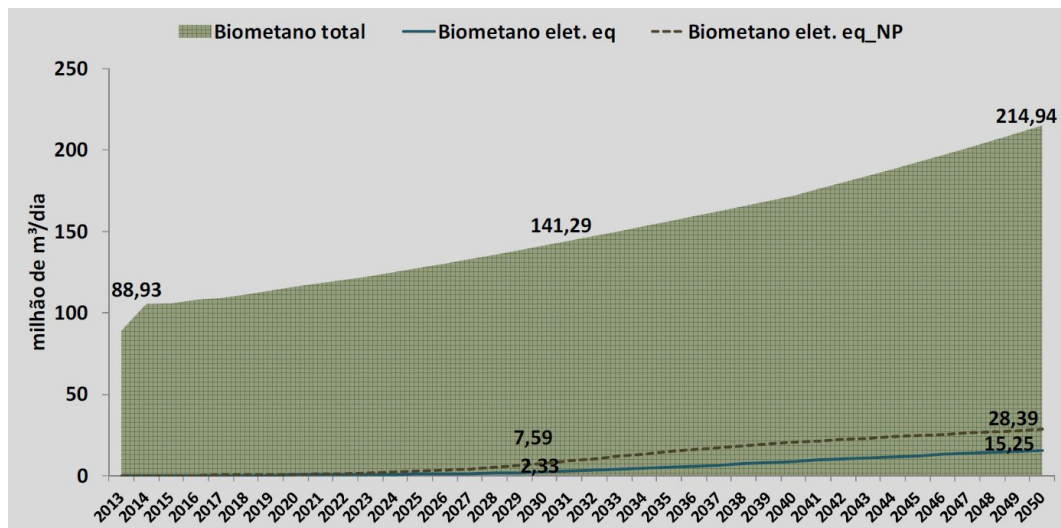


Figura 5.3: Projeção da penetração do biometano para GD versus seu potencial teórico. Fonte: [6]

Como pode ser visto na Figura 5.4, a geração de eletricidade na GD utilizando biogás só começará a ser expressiva a partir de 2030, quando haverá a difusão e consolidação de projetos de GD utilizando biogás, além da organização da cadeia de serviços do biogás. Os primeiros dez anos do estudo são cruciais para o estabelecimento de condições necessárias para a disseminação dessa modalidade de geração.

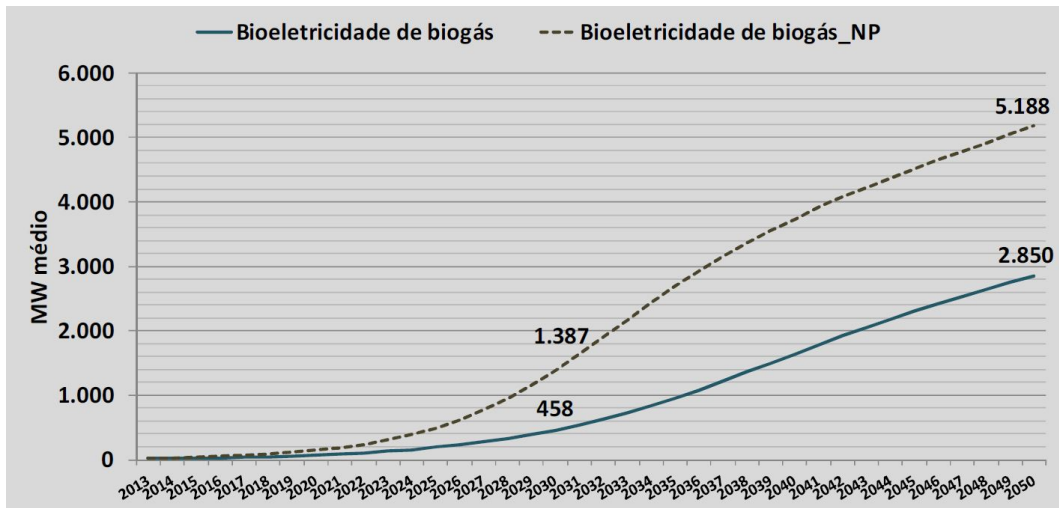


Figura 5.4: Previsão da energia gerada distribuída utilizando biogás. Fonte: [6]

É previsto também que os principais consumidores desse tipo de geração serão o setor público, utilizando resíduos urbanos, e o setor rural, utilizando resíduo rural. Além disso, ela será contratada no esquema de compensação de energia, tornando os consumidores em prosumidores.

5.1.3 Pequena escala no médio prazo

No estudo do plano decenal da pequena escala, foi feita uma projeção conjunta entre a geração distribuída fotovoltaica e a geração distribuída de biogás. No horizonte estudado, dentre as tecnologias de geração distribuída de pequena escala, destaca-se a solar fotovoltaica, apresentando-se com maior potencial de penetração. Estima-se que em 2026 a geração solar fotovoltaica distribuída atenderá 0,6% de todo o consumo nacional, com cerca de 770 mil adotantes dessa modalidade.

Além das unidades consumidoras previstas em adotar a geração distribuída fotovoltaica no horizonte decenal, é considerado também uma parcela da inserção da GD fotovoltaica através de contratação via chamadas públicas promovidas pelas distribuidoras. Esse modelo de negócio será viabilizado nos próximos anos, após sancionada a Lei 13.203 [34], que autoriza o repasse integral dos custos de aquisição de energia elétrica pelos distribuidores para a tarifa de seus consumidores finais até um Valor Anual de Referência Específico (VRES), definido pela EPE. Prevê-se que esse modelo de negócio tenha maior atratividade entre os consumidores da alta tensão.

O resultado das previsões da micro e minigeração distribuída e da geração distribuída contratada pelas distribuidoras é apresentado no gráfico da Figura 5.5.

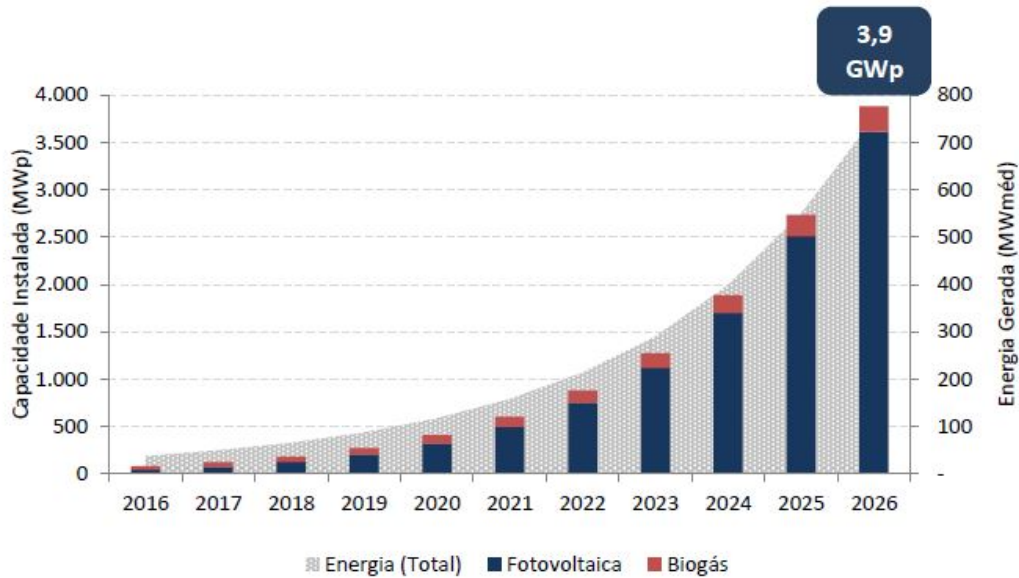


Figura 5.5: Capacidade instalada e energia a partir da geração distribuída fotovoltaica e de biogás. Fonte: [30]

5.2 Larga Escala

No estudo de Demanda de Energia do Plano Nacional de Energia 2050 da EPE [6] foi considerada como GD de larga escala a autoprodução de energia, que se classifica como a geração de eletricidade do consumidor com instalações próprias e que não utiliza a rede elétrica das concessionárias de transmissão e distribuição. A autoprodução de energia representa uma significativa parcela de geração de energia elétrica no país, atualmente 10%.

A cogeração é considerada a principal forma de autoprodução de energia, que se denomina como a geração simultânea de calor e eletricidade com um único combustível, aumentando assim o rendimento de um processo industrial. Sendo assim, o mercado potencial da autoprodução considerado para a previsão da GD em larga escala no país é o segmento industrial, que utiliza grande quantidade de vapor e eletricidade no processo de produção e, ao mesmo tempo, gera resíduo que pode ser posteriormente utilizado como fonte energética, seja para geração de eletricidade ou para fins térmicos. Os principais segmentos industriais com a possibilidade de cogeração são: papel e celulose, siderurgia, química e petroquímica, refino de petróleo, setor sucroalcooleiro, alimentos e bebidas e produção têxtil [6].

Outra possibilidade de autoprodução de eletricidade já utilizada no país é através da geração termelétrica a gás natural nas plataformas *offshore*. Com a previsão de exploração do Pré-sal, essa modalidade deve ganhar mais destaque, com aumento na demanda de energia elétrica nestas plataformas.

5.2.1 Premissas

No estudo do Plano Nacional de Energia - 2050 foram feitas premissas para cada segmento industrial com possibilidade de cogeração. Uma das premissas é que os novos empreendimentos na indústria da celulose tenham sua demanda de energia elétrica atendidas pela cogeração. Supõe-se que haverão casos em que o empreendimento será capaz também de ofertar seu excesso de geração para o sistema elétrico.

No caso da indústria siderúrgica, há três rotas tecnológicas possíveis para a expansão da capacidade instalada: rota integrada com coqueria própria, rota integrada sem coqueria própria e rota semi-integrada. Para cada rota tecnológica foi avaliado o respectivo potencial de cogeração, usando como base a prática existente atualmente no parque siderúrgico brasileiro. Na análise da indústria petroquímica, supôs-se que toda a expansão da produção de eteno a partir de nafta seja realizada por autoprodução.

Os níveis de atividade setorial dos segmentos de açúcar e álcool, de exploração e produção de petróleo e gás natural e do segmento de refino estão correlacionados com suas respectivas possibilidades de autoprodução. Dessa forma, a autoprodução no segmento sucroalcooleiro se correlaciona com a produção de cana para o açúcar e o etanol, assim como a autoprodução em refinarias se correlaciona com o montante de carga processada. A autoprodução na exploração e produção de petróleo e gás natural se correlaciona com a produção de petróleo, havendo distinção entre produção no Pós e Pré-sal: considerou-se que a exploração no Pré-sal necessita de maior eletricidade para a extração da mesma quantidade de petróleo.

Na Tabela 5.4 encontram-se os indicadores de crescimento de produção por ano e o índice de auto-produção atual por segmento industrial, dados essenciais para a elaboração da previsão de autoprodução desses segmentos industriais.

Segmento Industrial	Crescimento da Produção física	Índice de auto-produção
Celulose	29,5 10 ⁶ t/ano	950 kWh/t celulose
Petroquímica (eteno)	5,7 10 ⁶ t/ano	1.540 kWh/t eteno
Siderurgia (aço bruto)	45,4 10 ⁶ t/ano	-
Rota integrada com coqueria própria destinada à produção de placas	9,4 10 ⁶ t/ano	390 kWh/t aço
Rota integrada com coqueria própria	21,9 10 ⁶ t/ano	280 kWh/t aço
Rota semi-integrada	6,4 10 ⁶ t/ano	0 kWh/t aço
Refino de petróleo	5.459 10 ⁶ m ³ /ano	16 kWh/m ³ Petróleo
Sucroalcooleiro	590 10 ⁶ t/ano	23 kWh/t Cana
E&P (petróleo)	5.934 10 ⁶ m ³ /ano	100 kWh/m ³ Petróleo

Tabela 5.4: Indicadores/Premissas para segmentos industriais selecionados. Fonte: [6]

5.2.2 Previsões a longo prazo

Com base nas premissas citadas no tópico anterior, foi feita a projeção da autoprodução dos grandes consumidores industriais de energia elétrica para o estudo do Plano Nacional de Energia 2050 da EPE, como pode ser vista na Tabela 5.5. A autoprodução desses segmentos deverá crescer 2,8% por ano no período do estudo, enquanto seu consumo de energia crescerá 1,9% ao ano.

Segmento	2013	2020	2030	2040	2050
Bauxita	0	0	0	0	0
Alumina	383	383	383	383	383
Alumínio Primário	2740	2740	2740	2740	2740
Siderurgia	5205	6048	9469	12047	12878
Ferro ligas	136	136	136	136	136
Pelotização	542	542	542	542	542
Cobre Primário	0	0	0	0	0
Soda	119	119	119	119	119
Petroquímica	2459	2459	4133	7488	8920
Celulose	9901	20412	32977	39558	45818
Pasta mecânica	7	7	7	7	7
Papel	803	1857	5175	8516	10904
Cimento	96	96	96	96	96
Total	22390	34798	55775	71631	82542

Tabela 5.5: Grandes consumidores industriais: autoprodução por segmento (GWh). Fonte: [6]

Apesar do crescimento da autoprodução dos grandes consumidores industriais,

nem toda demanda de energia desses segmentos será suprida por autoprodução no horizonte de estudo. Atualmente, 23% do consumo de eletricidade é suprida por autoprodução e, a partir de 2030, ela passará a responder por 30% deste consumo. Na Figura 5.6 é possível observar o montante de consumo de eletricidade total que é atendido por autoprodução e que é consumido na rede, por ano de estudo.

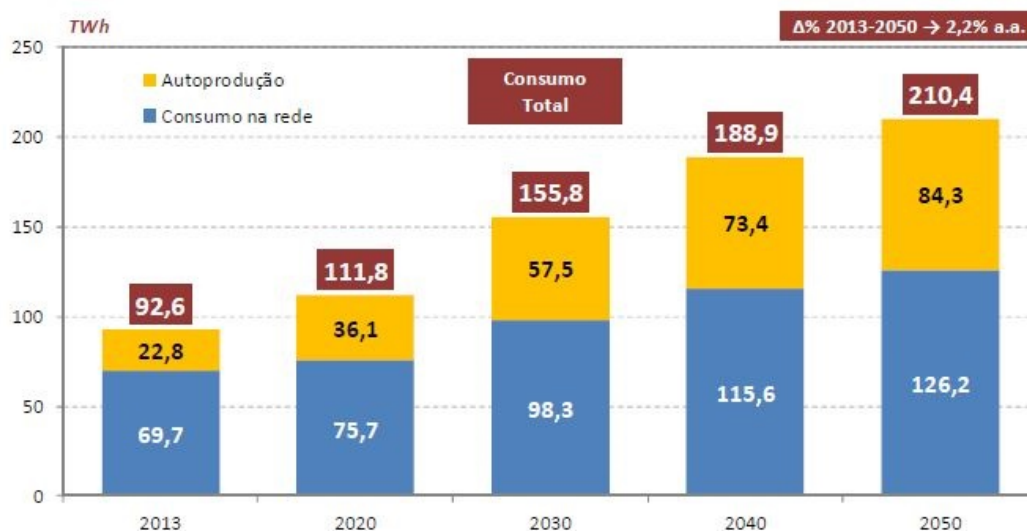


Figura 5.6: Grandes consumidores industriais: consumo de eletricidade, 2013-2050 (TWh). Fonte: [6]

Além da previsão de autoprodução de grandes consumidores industriais, foi feita também a previsão da autoprodução no setor sucroalcooleiro e nas refinarias de petróleo e plataformas de extração de petróleo *offshore*. A soma da autoprodução desses setores com os grandes consumidores industriais resulta na autoprodução total do país. De acordo com a EPE [6], é previsto um crescimento acelerado da autoprodução total no país até 2020, em torno de 7%, e após isso, terá um crescimento mais lento, com uma taxa média de 2,6% ao ano no horizonte de estudo. Em 2020, a autoprodução representará cerca de 12% do consumo total do país, caindo gradativamente até corresponder a 8% do consumo total.

O montante de autoprodução no final do horizonte de estudo equivale a uma carga de 17 GW médio, correspondendo a quase o dobro da garantia física da usina hidrelétrica de Itaipu. A projeção de autoprodução de eletricidade ao longo do período de estudo do PNE encontra-se na Figura 5.7, sendo “Outros” a soma do setor sucroalcooleiro e das refinarias de petróleo e plataformas de extração de petróleo *“offshore”*.

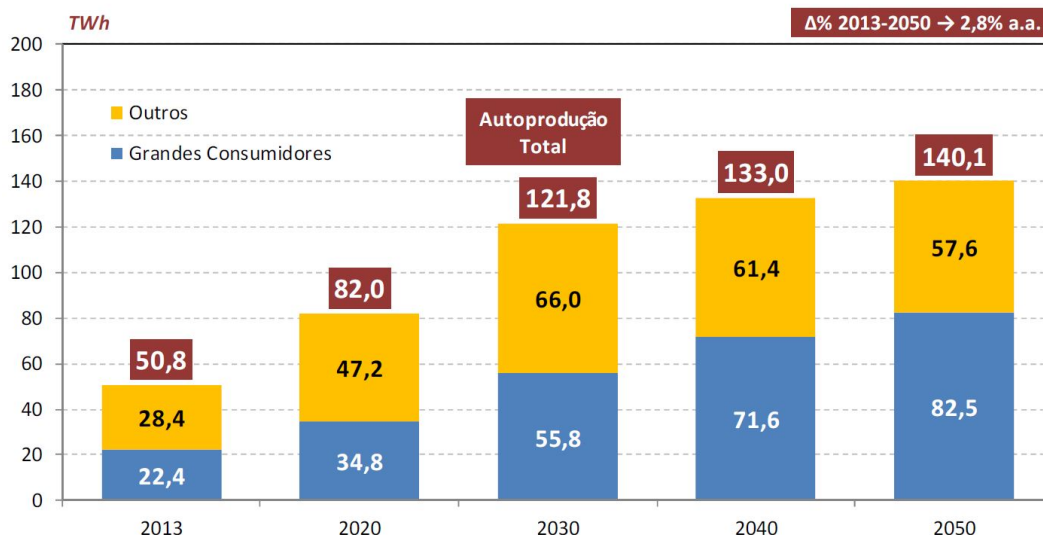


Figura 5.7: Projeção de autoprodução total de eletricidade, de 2013 a 2050 (TWh).
Fonte: [6]

5.2.3 Previsões a médio prazo

Com base nas premissas apresentadas anteriormente, foi feita a projeção da autoprodução de eletricidade para o horizonte decenal [31]. É importante ressaltar que a autoprodução de “Outros” segmentos inclui uma parcela relativa à geração distribuída fotovoltaica. Estima-se ainda que, ao final do horizonte de estudo, a geração distribuída de grande porte permita reduzir o consumo do SIN em 99 TWh evidenciando a sua importância no sistema elétrico nacional

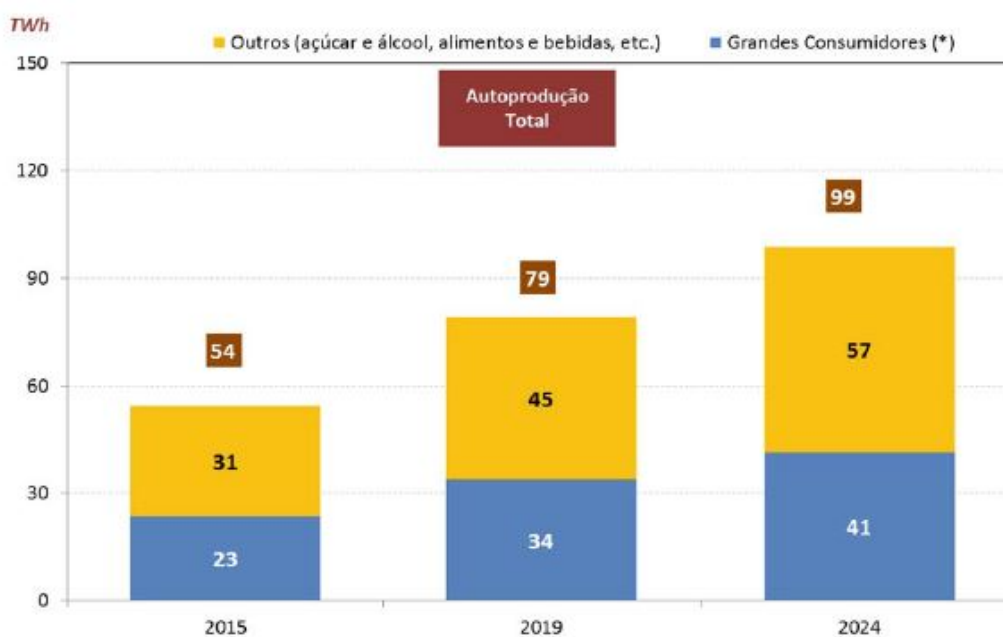


Figura 5.8: Projeção de autoprodução de eletricidade no horizonte decenal, 2015-2024 (TWh). Fonte: [31]

Capítulo 6

Conclusão e Trabalho Futuro

6.1 Conclusão

O uso da micro e minigeração distribuídas no país surge como uma alternativa ao atendimento elétrico aos diversos setores da sociedade, com algumas fontes mais propícias para o uso em certos setores do que outras. As políticas públicas de incentivo à Geração Distribuída estão diretamente ligadas à maior adoção por parte da sociedade nesta modalidade de geração. Isenção de impostos, criação de linhas de financiamento e o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD) são alguns dos exemplos de incentivos já adotados pelo Governo.

Não apenas as políticas públicas, o custo da tarifa de energia elétrica no país também é determinante para a popularização da mesma. Uma vez que as tarifas de energia elétrica sofrem constantes reajustes, encarecendo a energia ainda mais, buscar alternativas para gerar sua própria energia tem atraído cada vez mais a população.

Neste trabalho foi analisada a situação atual de cada fonte de energia na micro e minigeração distribuídas no Brasil, explicitando os motivos para uma maior adoção de uma modalidade frente as opções. Foram mostradas também as principais características e fundamentos de cada fonte de geração. Foi possível observar que a fonte solar fotovoltaica possui uma maior aceitação da sociedade por diversos fatores, como sua modularidade, a crescente queda no custo de sua instalação e o clima brasileiro propício, com um alto índice de irradiação solar em grande parte do país.

No capítulo 5 foram mostradas as projeções da geração distribuída no Brasil de acordo com três diferentes pesquisas elaboradas pela Empresa de Pesquisa Energética, exibindo as previsões da micro e minigeração distribuídas e também a da geração distribuída de larga escala, a autoprodução. De acordo com essas projeções, a micro e mini GD desempenharão papel decisivo na matriz energética brasileira até 2050, com ênfase na geração solar fotovoltaica e na geração térmica utilizando

biomassa. Foi mostrado também que, apesar da autoprodução de energia utilizando usinas térmicas a biomassa apresentar crescimento, não acompanhará o crescimento das outras fontes de energia no Brasil e passará a representar uma menor parcela da matriz de energia elétrica.

Apesar das projeções feitas pelos estudos da EPE concluírem uma forte inserção da Geração Distribuída nos próximos anos, é importante analisar que esses resultados podem não se concretizar. Além de previsões serem passíveis de erro e que as premissas consideradas podem não ocorrer como o planejado, deve-se levar em consideração também o fato do Plano Nacional de Energia 2050 [6] ter sido realizado antes da crise econômica no país. A crise teve início em 2014 e levou a um recuo no Produto Interno Bruto (PIB) por dois anos consecutivos e a uma taxa de desemprego de 13,7% em março de 2017. Este é um acontecimento não previsto pelo estudo de longo prazo e que pode impactar diretamente na adoção da Geração Distribuída pela população, uma vez que o investimento inicial requerido para a instalação da mesma é alto e, com o recuo da economia, grande parte da população pode hesitar em fazer esse investimento.

A geração distribuída constitui uma nova forma de geração de energia elétrica. Neste trabalho foi mostrado que, atualmente, as barreiras para a popularização desta modalidade estão sendo ultrapassadas, possibilitando uma maior adoção da micro e minigeração distribuída. Os resultados deste trabalho mostram que a tendência é um aumento cada vez maior na instalação de geradores sustentáveis em unidades consumidoras, diversificando a matriz de energia elétrica brasileira e gerando benefícios para todos os setores da sociedade.

6.2 Trabalho Futuro

Para uma análise mais aprofundada sobre o tema e mais específica para a realidade da Universidade Federal do Rio de Janeiro, indica-se um estudo sobre a possibilidade da implantação da Geração Distribuída no campus do Fundão e quais fontes de geração poderiam ser implantadas.

Referências Bibliográficas

- [1] ANEEL. *Resolução nº 482 de 17 de abril de 2012*. 2012. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acessado em: 11/06/2018.
- [2] G. PEPERMANS, J. DRIESSEN, D. HAESLONCKX, R. Belmans, and W. D'HAESELEER. *Distributed Generation: definition, benefits and issues*. Energy Policy, 2005.
- [3] Brasil. *Decreto nº 5163 de 30 de Julho de 2004*. Diário Oficial, Brasília, 30 de Julho de 2004.
- [4] ANEEL. *Resolução nº 687 de 24 de novembro de 2015*. 2015. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acessado em: 11/06/2018.
- [5] ANEEL. *Resolução nº 786 de 17 de outubro de 2017*. 2017. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2017786.pdf>. Acessado em: 11/06/2018.
- [6] EPE. *Plano Nacional de Energia - 2050*. 2014. Empresa de Pesquisa Energética.
- [7] Gazeta do Povo. *Gerar energia em casa está mais barato e 'fazenda solar' desponta como opção*. 2017. Disponível em: <https://tinyurl.com/yanhq96>. Acessado em: 12/05/2018.
- [8] IRENA. *Renewable Power Generation Costs in 2017*. 2018. International Renewable Energy Agency, IRENA. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Jan/IRENA_2017_Power_Costs_2018.pdf.
- [9] WWEA. *Wind Power Capacity Reaches 539 GW, 52,6 GW added in 2017*. 2018. World Wind Energy Association. Disponível em: <http://www.wwindea.org/2017-statistics/>.

- [10] ANEEL. *BIG - Banco de Informações de Geração*. 2018. Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>. Acessado em: 14/05/2018.
- [11] ANEEL. *Atlas de Energia Elétrica do Brasil - 2ª edição*. 2005. Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL.
- [12] Burnham, Johanson, Kelly, Reddy, and Williams. *Renewable Energy*. Washington, USA, 1992.
- [13] Solar Energy. *Como Funciona a Energia Solar*. Disponível em: <http://solarenergy.com.br/saiba-como-funciona-a-energia-solar/>.
- [14] Marion et al. *Performance parameters for grid-connected PV systems*. In: *IEEE PHOTOVOLTAICS SPECIALISTS CONFERENCE AND EXHIBITION*. Florida, 2005.
- [15] MME. *Energia Solar no Brasil e no Mundo*. 2017. Ministério de Minas e Energia, MME. Disponível em: <https://tinyurl.com/yce2dxxe>.
- [16] CERPCH. *PCH - O que é?* CENTRO de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas - CERPCH. Itajubá: EFEI. Disponível em: <https://cerpch.unifei.edu.br/pt/o-que-e/>.
- [17] A. ARCE and T. OHISHI. *Optimal dispatch of generating units of the Itaipu hydroelectric plant*, volume 17. 2002.
- [18] ANEEL. *Unidades Consumidoras com Geração Distribuída*. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <https://tinyurl.com/y6wobuqz> Acesso em 05/07/2018.
- [19] Ecom Energia. *A evolução do mercado de Geração Distribuída no Brasil*. Disponível em: <http://www.ecomenergia.com.br/a-evolucao-do-mercado-de-geracao-distribuida-no-brasil/>.
- [20] MME. *Brasil lança Programa de Geração Distribuída com destaque para energia solar*. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <https://tinyurl.com/y98wue3j> Acesso em 05/07/2018.
- [21] Portal Solar. *Geração Distribuída*.
- [22] Revista Exame. *BNDES anuncia financiamento de energia solar para pessoa física*. Disponível em: <https://exame.abril.com.br/economia/>

bndes-anuncia-financiamento-de-energia-solar-para-pessoa-fisica/
Acesso em 05/07/2018.

- [23] AMARANTE O., ZACK M., and SÁ A. *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*. 2001.
- [24] Instituto Ideal. *Como faço para ter energia eólica em minha casa?* Disponível em: <http://institutoideal.org/guiaeeolica/> Acesso em 01/07/2018.
- [25] A. dos Santos Costa. *O ruído ambiental de aerogeradores de pequena dimensão*, 2014.
- [26] ABRAPCH. *Custo médio de PCHs e CGHs ficou em R\$ 225/MWh desde 2010, aponta estudo*. Associação Brasileira de PCHs e CGHs. Disponível em: <http://www.abrapch.org.br/Noticias/2448/custo-medio-de-pchs-e-cghs-ficou-em-r-225mwh-desde-2010-aponta-estudo> Acesso em 01/07/2018.
- [27] COGEN. ASSOCIAÇÃO DA INDÚSTRIA DE COGERAÇÃO DE ENERGIA. *GT COGEN Solar: inserção da energia solar no Brasil*. Disponível em: http://www.cogen.com.br/info_doc_solar.asp.
- [28] Época Negócios. *Custo de instalação de equipamentos de energia solar cai 50% no país*. Disponível em: <https://epocanegocios.globo.com/Brasil/noticia/2018/02/custo-de-instalacao-de-equipamentos-de-energia-solar-cai-50-no-pais.html>.
- [29] Gasparin F. and Krenzinger A. *Desempenho de um sistema fotovoltaico em dez cidades brasileiras com diferentes orientações do painel*, volume 8. Revista Brasileira de Energia Solar, 2017.
- [30] EPE. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2026*. 2017. Empresa de Pesquisa Energética.
- [31] EPE. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2024*. 2015. Empresa de Pesquisa Energética.
- [32] A. A. MONTENEGRO. *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, S.C., 2013.
- [33] IEA. *Energy Technology Perspectives 2012*. Paris, 2012. International Energy Agency, IEA.

[34] Brasil. *Lei nº 13.203, de 8 de Dezembro de 2015*. Diário Oficial, Brasília, 8 de Dezembro de 2015.