

Bases Conceituais da Energia

Geração, transformação e uso de energia pela sociedade

A energia é utilizada em várias atividades da sociedade, como transporte, força motriz, iluminação, etc., e sua disponibilidade proporciona bem-estar à sociedade, pois possibilita a realização de várias atividades importantes ao homem que não eram sequer imaginadas no passado. A energia move o crescimento econômico e promove o desenvolvimento de uma sociedade, permitindo que a mesma possa atingir e usufruir de um alto padrão de vida. A geração, o transporte e o uso de energia, contudo, causam outros efeitos além dos inicialmente pensados afetando de formas variadas o meio ambiente e também a sociedade (poluição, mudanças climáticas, doenças ou morbidade para as populações humanas e de animais, alterações da biodiversidade, desertificação de regiões e outros impactos). À medida que uma sociedade se desenvolve e aumenta o uso de energia ocorrem duas coisas: aumento do bem-estar de seus habitantes e aumento de impactos socioambientais adversos.

Devido a isto, a sociedade iniciou questionamentos importantes a respeito do uso de energia como: 1) Quanta energia está disponível no meio ambiente para uso pela sociedade? Quais são as fontes de energia utilizáveis? Quais são os propósitos do uso de energia pela sociedade ou seus usos finais? São eles justificáveis? 2) Quais são os impactos das várias tecnologias energéticas? São elas sustentáveis? 3) Qual é o custo da energia? Ou melhor, qual seu custo efetivo levando em conta, além dos custos de produção e distribuição, também os custos oriundos de impactos ambientais e sociais que ela gera e que a sociedade, de uma forma ou de outra, tem que pagar para garantir o bem estar social?

Todas essas questões são atualmente consideradas pela sociedade quando se discute a questão de energia. Neste capítulo vamos discutir sobre o 1º conjunto de questões e mencionar rapidamente o 2º conjunto de questões. Antes de continuar temos que fazer algumas definições de termos que foram introduzidos ou que irão aparecer ao longo do capítulo.

1. Consumo de energia e potência pela sociedade

O uso de energia e potência (energia por unidade de tempo) pela sociedade evoluiu ao longo do tempo. Inicialmente, o ser humano vivia da coleta de alimentos e caça e gastava muita energia para consumi-los, isto é, digeri-los e obter as calorias necessárias para sua subsistência. A energia disponível ao ser humano era basicamente a bioquímica de seu corpo. Com a descoberta do fogo e seu uso para assar e cozer os alimentos, estes passaram a ser consumidos com muito mais facilidade. A quantidade de tempo e energia gastos para consumir a mesma quantidade de alimentos e obter as calorias necessárias para sua subsistência diminuiu bastante. Houve, pode-se dizer, um grande ganho de eficiência energética com o uso do fogo pela sociedade. O homem caçador-coletor evoluiu até o surgimento de cidades, ou da urbanização, por meio da revolução agrária. Iniciou-se uma série de avanços tecnológicos como o uso de alavancas, arado, veículos com tração animal, roda etc.

Nesta época, cerca de 11000 anos atrás, a quantidade de energia disponível ao ser humano havia aumentado bastante, pois ele contava com o fogo, tração animal, torque da alavanca, etc (Harari, 2015).

Houve um longo período de aprendizagem por difusão de conhecimentos simples, no qual algumas pessoas desenvolviam novas técnicas por experimentação ou descoberta, mas sem um rigor científico, e a grande maioria aprendia novas técnicas por observação das técnicas utilizadas por outras pessoas. As novas descobertas vinham de um surto de criatividade de algumas pessoas. As sociedades norte-africana e eurásiana estavam mais ou menos em um estágio de desenvolvimento semelhante (Harari, 2015). Entre 1500 e 1700 estima-se que 80 % das pessoas se dedicavam a agricultura e o restante 20 % trabalhavam em outras atividades como governantes, comerciantes, educadores, sacerdotes, burocratas, artesãos produtores de roupas, sapatos, etc. (Marr, 2012). O uso de energia pela sociedade não se alterava muito aumentando com o crescimento vegetativo da população. Algumas sociedades, entretanto, experimentaram em seu processo de desenvolvimento a revolução científica e industrial e aí o uso de energia começou a crescer exponencialmente.

A partir de 1500, o estabelecimento do processo de investigação científica por vários estudiosos como Kepler, Galileu, Bacon, Newton e outros possibilitaram uma maior inquirição e posterior compreensão do funcionamento da natureza e o desenvolvimento de máquinas mais complexas (Harari, 2015). Os portugueses aprimoraram as naus e os instrumentos de navegação, cruzaram os oceanos, descobriram novas terras e foram seguidos por espanhóis, franceses, holandeses e ingleses. Também estudaram o plantio da cana de açúcar existente no oriente médio, aprimoraram o processo e iniciaram grandes plantações nas ilhas dos Açores e em Pernambuco (Furtado, 2006). Em alguns locais, como a Escócia, o método científico de resolver problemas se propagou pela sociedade e surgiram pequenas fábricas nas casas das pessoas (Harari, 2015). Por volta de 1700 na Escócia surgiram máquinas de fiar e tecer, metalúrgicas estabelecidas em casas de famílias e fabricantes de pregos, fivelas, parafusos e botões em oficinas familiares. Mineradores tentavam desenvolver máquinas para retirar água das minas de carvão cada vez mais profundas. A Grã-Bretanha contava com um grande número de inventores, abundância de matéria prima, produção excedente de alimentos e um conjunto de leis que favoreciam os direitos desses novos inventores (Marr, 2012).

Em 1712 Newcomen desenvolveu uma máquina a vapor para bombear água de minas de carvão na Escócia. Esta máquina era extremamente ineficiente. Em 1763 James Watt tinha uma loja de consertos e reformas de instrumentos e engenhocas na cidade de Glasgow. Prestava serviço para estaleiros, docentes da Universidade de Glasglow e fabriquetas da região. Foi então contratado para consertar um motor de Newcomen. Consertou o motor, mas o achou muito ineficiente, pois grande parte do vapor escapava para o meio ambiente, e resolveu aprimorá-la. Depois de quase 10 anos trabalhando em uma nova máquina e garantir com sócios financiadores os direitos de patente, ele conseguiu construir e vender máquinas a vapor muito mais eficientes que as de 1712. Até 1800 ele vendeu cerca de 450 máquinas a vapor, mas agora não só para bombear água em minas de carvão, mas para serem instaladas em navios, locomotivas e em infinidades de pequenas fábricas que faziam atividades repetitivas. A revolução industrial eclodira e logo foi acompanhada por outros países (Marr, 2012).

A passagem de uma organização rural (agrária) para uma urbana e industrial alterou profundamente a sociedade devido ao uso de tecnologias modernizantes. Iniciou-se o processo de uso de energias fósseis em detrimento das fontes renováveis até então predominantes. O carvão teve presença marcante no século 19 e o petróleo predominou a partir do início do século 20. A taxa de geração e uso de energia, isto é, potência gerada ou consumida, cresceu exponencialmente. As Tabelas 1 e 2 apresentam a evolução do consumo de potência ao longo do tempo nas sociedades agrárias e em sociedades industriais (Marr, 2012; Goldemberg e Lucon, 2008).

O crescimento da potência foi muito lento até 1700 e depois do desenvolvimento da máquina a vapor por Savery, Newcomen e, principalmente, por Watt a taxa de consumo explodiu, aumentou em 300 anos cerca de 6 ordens de magnitude. Nas sociedades agrárias as fontes de energia eram primordialmente renováveis: a biomassa, hidráulica e eólica. A partir da revolução industrial a taxa de consumo de energia se intensificou e a sociedade buscou fontes com maior densidade energética como o carvão e o petróleo. O carvão já era usado antes de 1700 na Europa como um material combustível mais energético que a lenha, mas após a revolução industrial ele se tornou predominante.

Destaca-se aqui a importância da máquina a vapor para geração de potência ou geração contínua de energia ao longo do tempo. Por exemplo, uma usina nuclear utiliza a tecnologia das máquinas a vapor para gerar eletricidade ou propulsão de navios ou submarinos. Os trabalhos do *engenheiro de energia* James Watt revolucionaram o mundo. Outro ponto importante evidenciado pelas tabelas abaixo é que a sociedade consome energia continuamente ao longo do tempo, isto é, potência. Há tantas atividades sendo realizadas ao mesmo tempo no mundo atual que é necessário disponibilizar potência de forma contínua.

Tabela 1 – Evolução do consumo de potência ao longo do tempo em sociedades agrárias e pouco urbanizadas (Goldemberg e Lucon, 2008)*.

Tecnologia	Data	Potência (W)
Homem usando alavanca	3000 AC	37
Boi puxando carga	3000 AC	370
Turbina de água	1000 AC	300
Roda d'água vertical	350 AC	2.240
Moinho de vento Turret	1600	10.500

* Potência de chuveiro elétrico simples: 2000 W.

Tabela 2 – Evolução do consumo de potência ao longo do tempo a partir da revolução industrial (Goldemberg e Lucon, 2008).

Tecnologia	Data	Potência (W)
Bomba a vapor de Savery	1697	746
Máquina a vapor de Newcomen	1712	4.100
Máquina a vapor de Watt (terrestre)	1800	30.000
Máquina a vapor naval	1843	112.000
Turbina de água	1854	600.000
Máquina a vapor (naval)	1900	6.000.000
Máquina a vapor (terrestre)	1900	9.000.000
Turbina a vapor	1906	13.000.000
Turbina a vapor	1921	30.000.000
Turbina a vapor	1943	215.000.000
Usina a carvão	1973	1.100.000.000
Usina nuclear	1980	1.350.000.000

As fontes de energia que a sociedade moderna considera para a geração de eletricidade, calor, acionamento de motores, etc são variadas. Devido aos impactos ambientais causados pelo uso tão intenso de potência, como ocorre nos dias de hoje, voltou-se a considerar as fontes renováveis e outras fontes não emissoras de gases do efeito estufa. A matriz energética de vários países hoje é bastante variada. As fontes eólica e biomassa, importantes na época agrária, voltaram a ter importância relevante e foram reintroduzidas pelo desenvolvimento tecnológico e científico dos últimos 20 anos. Como é a geração e o consumo de potência nas sociedades industriais modernas como o Brasil? Discutimos estas questões na próxima seção.

2. Energia primária e centros de transformação energética e energia de uso final

Energia primária é a energia disponível para a sociedade na sua forma natural, isto é, como se encontra na natureza. Como exemplo de energia primária temos a energia hidráulica, energia solar, energia eólica, biomassa (lenha, resíduos vegetais e animais), urânio, carvão, petróleo, gás natural, energia das marés, energia geotérmica, etc. Estas formas de energia normalmente não podem ser usadas diretamente pelo ser humano. O urânio deve ser fissionado por nêutrons para gerar calor e eventualmente eletricidade. O petróleo deve ser refinado para a forma de gasolina ou óleo diesel para eventualmente fazer a combustão em um motor. Algumas, entretanto, podem ser utilizadas conforme encontramos na natureza, como por exemplo, o gás natural.

Energia de uso final é a forma da energia apropriada para o uso pela sociedade. Esta energia pode ter a forma de eletricidade, calor ou combustível líquido. Estes dois conceitos mostram que para tornar viável o uso da energia primária disponível na natureza é necessário transformá-la em uma forma final útil para as várias máquinas ou sistemas existentes na sociedade. Os centros de transformação são sistemas industriais que transformam a energia primária em energia secundária que já pode estar na forma de energia de uso final. Exemplos de centros de transformação são refinarias de petróleo, plantas de gás natural, usinas nucleares, centrais hidrelétricas, carvoarias, destilarias, etc.

Os processos de transformação de energia apresentam perdas. Por exemplo, um reator nuclear transforma a energia nuclear contida no urânio em eletricidade por meio de uma máquina a vapor utilizando o ciclo de Rankine. Este ciclo em reatores PWR (reator a água pressurizada) tem eficiência térmica de 33 %. Portanto, desconsiderando todas as outras perdas, a potência secundária gerada na forma de eletricidade é apenas 33 % do total de energia primária disponível no urânio.

A energia secundária é utilizada por algum sistema de uso final de energia. Por exemplo, um chuveiro elétrico utiliza energia elétrica para gerar água quente, um automóvel utiliza combustível líquido para gerar movimento e uma lâmpada utiliza eletricidade para gerar luminosidade. Novamente aqui o sistema de uso final apresenta perdas. Nem toda a energia de uso final apresentada a uma lâmpada se transforma em energia luminosa e nem todo combustível líquido consumido em um veículo se transforma em energia cinética. Definimos como energia útil aquela parte que é efetivamente utilizada para gerar o produto ou serviço desejado após a última conversão nos próprios equipamentos ou sistemas.

A Figura 1 mostra a cadeia de transformação da energia primária em energia útil. Há perdas nos centros de transformação e nos sistemas de uso final de energia. Os processos típicos que requerem energia útil são força motriz, calor de processo, aquecimento direto, iluminação, eletroquímica e energia mecânica.

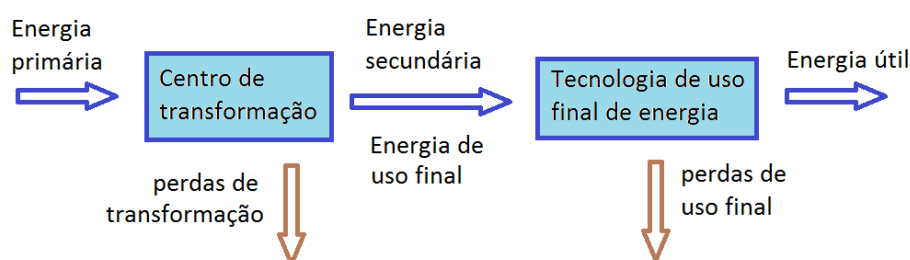


Figura 1 – Processos de transformação de energia e de uso final de energia.

3. Setor energético e cadeia energética

O setor energético em uma sociedade moderna é complexo. Ele envolve uma cadeia também complexa que inicia com a fonte de energia primária, passa pela geração de energia em centros de transformação, pelo transporte de energia e sua distribuição até os centros de consumo e uso final pela sociedade. A Figura 2 mostra esta complexa cadeia. A primeira observação importante é que as fontes primárias podem gerar diferentes formas de energia secundária. Conforme mostrado na figura, o petróleo pode produzir combustíveis líquidos, eletricidade ou calor dependendo do centro de transformação utilizado. O gás natural e a biomassa também.

O transporte da energia desde o centro de transformação até os centros de consumo passa por várias etapas. A eletricidade gerada em uma hidrelétrica até a uma residência ou indústria ou a gasolina produzida em uma refinaria até o automóvel de um cidadão envolve

várias etapas. Para chegar até o usuário final é requerido um sistema de transporte e de distribuição de energia. Define-se como transporte a etapa entre o centro de transformação até grandes centros consumidores como cidades e até grandes centros industriais. Define-se como distribuição o processo de levar a energia destes últimos até os consumidores finais. Os principais processos de transporte de energia são gasodutos, oleodutos e linhas de alta tensão elétrica. Os principais processos de distribuição de energia são gasodutos de menor porte, redes de distribuição elétrica ou linhas de média tensão elétrica, caminhões e trens para combustíveis líquidos, carvão e biomassa.

Nos processos de transporte e distribuição de energia também há perdas. Nos gasodutos e oleodutos podem ocorrer perdas por vazamentos e consumo de energia para o bombeamento. Na transmissão e distribuição de eletricidade há perdas devido ao efeito Joule nos cabos. Essas perdas são minimizadas fazendo este transporte via cabos de alta tensão.

A Figura 3 apresenta o sistema complexo de geração, transporte e distribuição de eletricidade. Há transformadores para alta tensão para o transporte de eletricidade com menores perdas e há transformadores para tensões mais baixas para a distribuição de eletricidade até os consumidores finais. Notem que os consumidores podem também ser geradores de energia. Por exemplo, uma indústria ou shopping center pode ter um gerador diesel e injetar eletricidade na rede de distribuição elétrica quando não estiver utilizando-a para consumo próprio; ou uma residência pode ter um gerador fotovoltaico e injetar na rede o excedente de geração de eletricidade além de seu consumo.

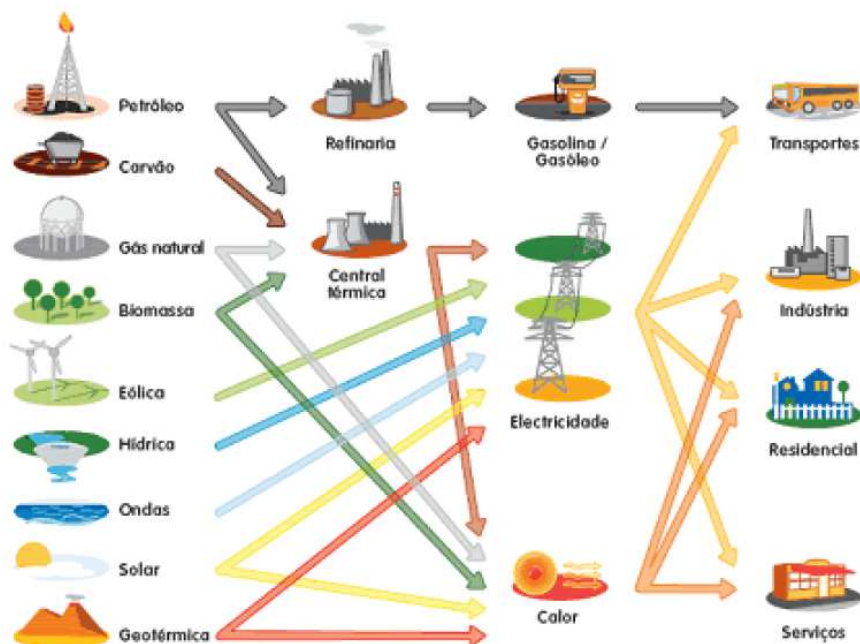


Figura 2 – Cadeia energética com várias fontes de energia primária e 4 usos finais principais.

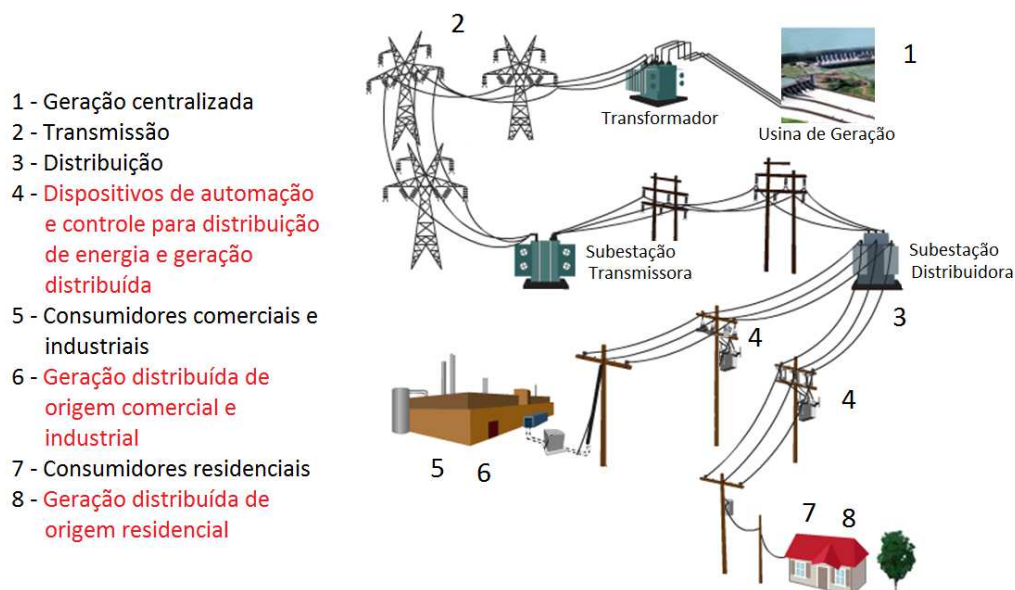


Figura 3 – Etapas entre a geração e o consumo de energia elétrica. Neste caso a fonte de energia é hidráulica e apresentam-se as linhas de transmissão (transporte) e distribuição de eletricidade até os consumidores finais. Notem que os consumidores podem também ser geradores de energia.

A engenharia de energia preocupa-se com a redução das perdas. Definimos a eficiência energética de um determinado uso final de energia como

$$\text{Eficiência energética} = \frac{\text{energia de uso final ou trabalho útil}}{\text{energia primária}}. \quad (1)$$

A eficiência energética neste caso leva em conta as perdas nos centros de transformação e nos sistemas de uso final de energia. A máquina a vapor de Watt era um processo de bombeamento de água a partir da energia primária (carvão). A energia útil era o trabalho de elevação da água. A grande contribuição tecnológica de James Watt foi melhorar a eficiência energética daquele sistema, isto é, ele conseguiu fazer o mesmo trabalho com muito menos energia.

A eficiência energética é considerada atualmente muito importante para reduzir impactos ambientais e para a racionalização econômica. Vários países adotam atualmente programas de eficiência energética e consideram a conquista de eficiência energética como mais uma fonte de energia, pois se a demanda econômica sobe 6 % e consegue-se uma

eficiência energética total de 1 %, torna-se necessário adicionar apenas 5 % de novas usinas de geração de energia. Os programas de eficiência energética iniciam estudando os rendimentos dos processos de transformação de energia e de uso final de energia e quanto eles podem ser melhorados. Após esses estudos de determinam a nova energia útil necessária. O conhecimento desta energia útil permite identificar quais setores econômicos são energeticamente menos eficientes e também determinar quais formas de energia podem ser utilizadas com maior eficiência nos vários processos. Com base nesses estudos podem-se identificar possíveis programas de substituição e de conservação de energia.

A Figura 4 apresenta a produção de energia primária no Brasil em 2014 expressa em milhões de tonelada equivalente de petróleo (tep). 1 tep equivale a 1×10^7 kcal ou $4,18 \times 10^7$ J. A produção total de energia primária atingiu 272,6 milhões de tep. Dentre as principais fontes de energia primária encontram-se fontes renovável e não renovável. Note que embora o Brasil tenha uma geração de eletricidade fortemente baseada na fonte hídrica e combustíveis líquidos como etanol e biodiesel, a principal fonte de energia primária é o petróleo.

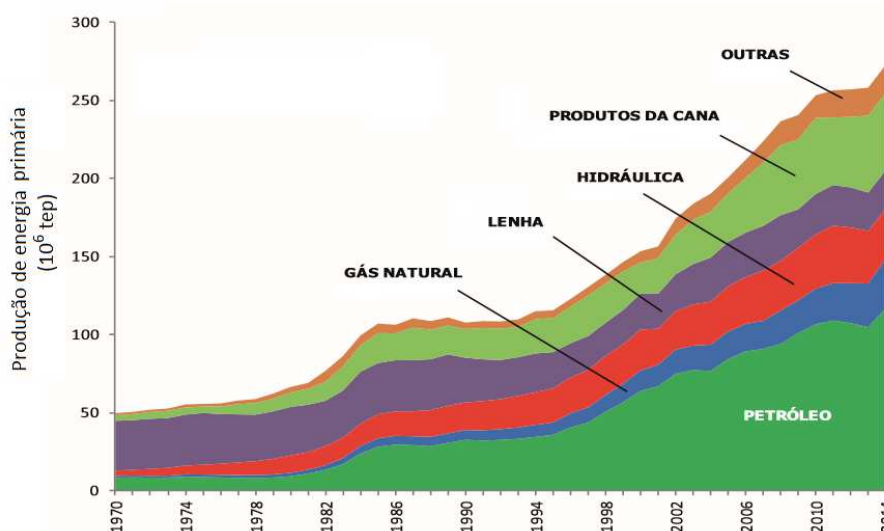


Figura 4 – Produção de energia primária no Brasil em 2014. Produção total de 272,6 Mtep (1 tep = 1×10^7 kcal ou $4,18 \times 10^7$ J) (BEN, 2015).

A Figura 5(A) mostra a evolução do consumo de energia primária nos países mais consumidores de 1980 a 2014. Notem que no Brasil, China, Índia, México e Indonésia, países em desenvolvimento, o consumo de energia tem uma taxa de crescimento elevada. Países desenvolvidos como os EUA, Japão, Reino Unido, França e Alemanha tem um consumo de energia primária declinante a partir de 2000. Esses países, entretanto, têm apresentado taxas de crescimento da economia positiva entre 0 e 2 %/ano neste período e têm conseguido dar

conta do crescimento da economia aumentando a eficiência energética, isto é, esses países produziram consumindo menos energia. O Brasil e os outros países em desenvolvimento, por outro lado, têm uma taxa de crescimento do consumo de eletricidade mais elevada devido à demanda da economia e também devido à demanda de seus cidadãos que desejam melhor seu bem estar e padrão de vida. Esses países tendem a continuar demandando mais eletricidade até atingirem um padrão de vida mais elevado. É claro que também devem investir em eficiência energética!

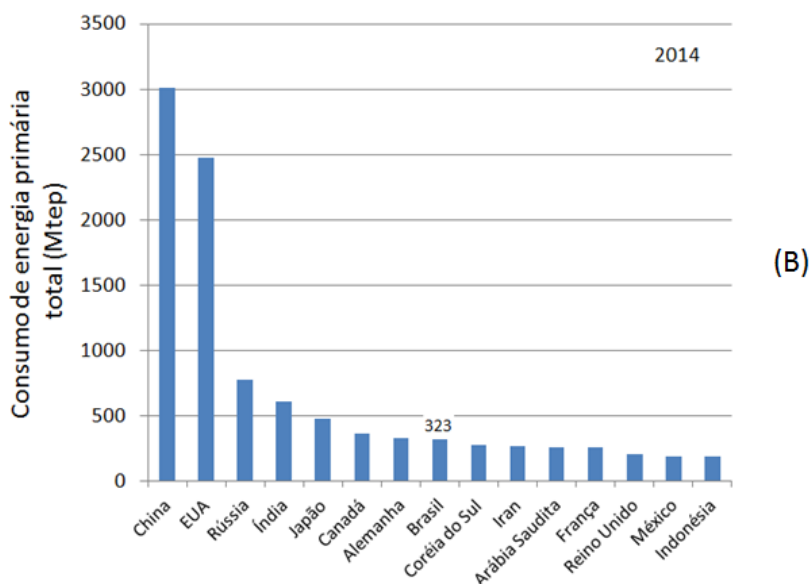
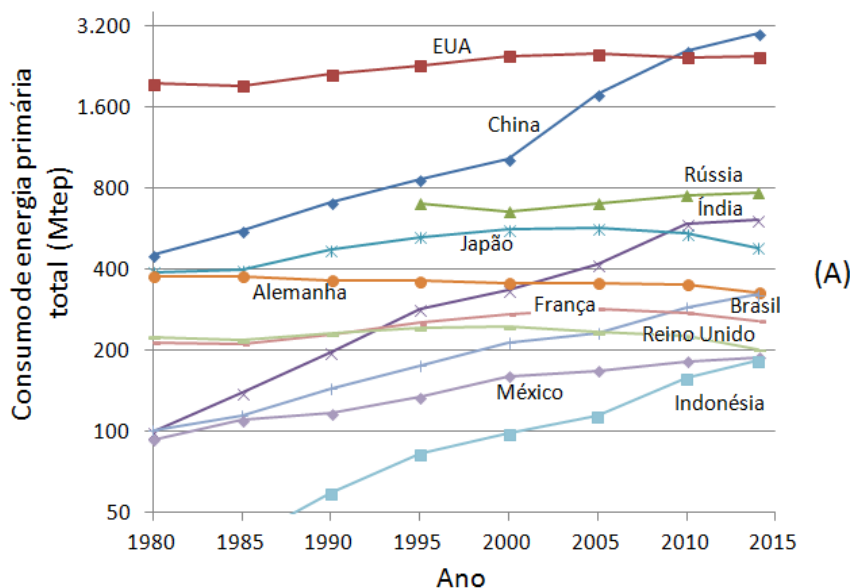


Figura 5 – Países que mais consomem energia primária no mundo em 2014. O Brasil consumiu 323 Mtep neste ano (EIA, 2016)

A Figura 5(B) mostra o consumo de energia primária dos principais países consumidores em 2014. Esses países são industrializados, grandes produtores de energia ou ambos. China e EUA são os países que mais consomem energia primária. Rússia, Canadá, Iran e Arábia Saudita são grandes exportadores de energia primária (petróleo e gás natural). O Brasil é o 8º consumidor de energia primária e consome 323 Mtep e, portanto, é um importador de energia primária, pois produziu em 2014 menos do que esta quantidade (veja Figura 4).

4. Potencial e reservas de energia primária

Para que o Brasil possa ofertar à sociedade a quantidade de energia apresentada na Figura 5 é necessário possuir reservas de energia primária não renovável e potencial de energia renovável de diversas fontes ou importá-las de outros países: petróleo, gás natural, carvão, urânio, energia hidráulica, lenha e carvão vegetal, cana de açúcar e diversos tipos de energia renovável. Vamos apresentar nesta seção o potencial e reservas de energia primária do Brasil e os vários tipos de centros de transformação correspondentes para viabilizar o fornecimento de energia na forma final adequada para os consumidores.

4.1. Potencial hidrelétrico do Brasil

Grande parte da energia elétrica brasileira é gerada por usinas hidrelétricas. As condições favoráveis de clima e relevo favorecem a geração hidrelétrica. Chuvas abundantes, pequenas montanhas e planaltos de 100 a 1000 m favorecem a formação de rios com grandes vazões e quedas apropriadas para a geração de hidrelétrica. As chuvas no Brasil são abundantes exceto na região Nordeste. Estas condições fazem com que no Brasil 85 % da eletricidade gerada em 2015 seja de origem hidrelétrica enquanto no mundo seja de 16 %.

A Tabela 3 apresenta o potencial hidrelétrico brasileiro. Em 2015 o potencial hidrelétrico, expresso em capacidade de geração (GW), era de 247,5 GW e o potencial já instalado e gerando energia era de 94,1 GW. Em 2010 o potencial instalado era de 74 GW evidenciando um crescimento de 5 %/ano do parque instalado. A tabela também mostra o percentual de aproveitamento em cada região do Brasil. Nota-se que o percentual de aproveitamento do potencial hídrico em 2015 no Brasil é 38 %.

À primeira vista, estes números sugerem que temos disponível ainda um grande potencial hidrelétrico, mas existem limitações para seu aproveitamento devido a fatores econômicos, sociais e ambientais. O aproveitamento do potencial hidráulico nos EUA, Japão e União Europeia chegou a aproximadamente 70 % do potencial disponível. No Brasil observamos que grande parte do potencial disponível se encontra na região amazônica e os grandes aproveitamentos disponíveis nas outras regiões já foram utilizados. Excetuando a região Norte, o potencial disponível nas outras regiões é principalmente de usinas hidrelétricas menores que 100 MW ou pequenas centrais hidrelétricas (PCH) com capacidade inferior a 30 MW. Dificilmente utilizaremos todo o potencial de 247,5 GW apresentado na Tabela 3 para gerar energia elétrica!

A energia hidrelétrica é renovável e sazonal. Em épocas de chuva e grandes vazões dos rios, a geração de eletricidade é maior e em épocas de seca, a geração é menor. Para proporcionar uma geração de eletricidade mais estável ao longo do ano normalmente são construídas hidrelétricas com barragens e grandes reservatórios. Assim, durante a época de chuva acumula-se água no reservatório e gera-se menos potência do que seria possível. Durante a seca libera-se a água acumulada e consegue-se uma geração maior do que se não houvesse o reservatório. O resultado final é uma geração mais uniforme ao longo de todo o ano.

Tabela 3 – Potência instalada e potencial hidrelétrico do Brasil em 2015 (ELETROBRAS, 2016).

Bacia	Potência instalada (GW)	Potência ainda disponível (GW)
Atlântico Leste	5,4	8,7
Atlântico Norte/Nordeste	0,59	2,3
Atlântico Sudeste	3,7	6,5
Bacia do Rio Amazonas	10,7	85,9
Bacia do Rio Paraná	43,4	18,9
Bacia do Rio São Francisco	10,7	11,9
Bacia do Rio Tocantins	13,2	13,7
Bacia do Rio Uruguai	6,3	5,4
TOTAL	94,1	153,4
Potencial total	247,5 GW	

A Figura 6 mostra a vazão do Rio Madeira ao longo do ano medida em vários anos. Nota-se uma variação ao longo do ano e uma variação entre os anos. Há uma variação devido à sazonalidade (estações do ano) e incertezas climáticas entre os vários anos. A variação sazonal pode ser muito grande. No caso do Rio Madeira, na época de seca, a vazão do rio cai normalmente para cerca de 1/5 da vazão máxima. A usina hidrelétrica é o centro de transformação de energia hidráulica em energia elétrica. A potência nominal ou instalada de uma usina hidrelétrica é potência máxima que ela pode gerar. Ao longo do ano a potência média de operação da usina é menor. A razão entre a potência média gerada ao longo de um ano, p_{med} , e a potência nominal, p_{nom} , é denominada fator de capacidade de uma usina, f_c , isto é,

$$f_c = \frac{p_{med}}{p_{nom}}. \quad (2)$$

No Brasil o fator de capacidade de nossas hidrelétricas é aproximadamente 50 %. Isto significa que ao longo do ano a potência média gerada pelas usinas hidrelétricas apresentadas na Tabela 3 é aproximadamente 50 % de 74 MW ou aproximadamente 34 MW médios.

A Figura 7 mostra a Usina de Itaipu com o vertedouro à esquerda, as 20 unidades geradoras com turbinas hidráulicas à direita e o reservatório ao fundo. A potência instalada da

usina de Itaipu é 14000 MW. Quando chove muito e o volume de água acumulado no reservatório da usina aproxima-se da sua capacidade máxima é necessário abrir comportas do vertedouro e permitir a água fluir rio abaixo sem geração de energia evitando o transbordamento da água sobre a barragem). Os vertedouros são abertos também para regularizar a vazão do rio para diversos usos demandados pela sociedade como a navegação e o fornecimento de água para cidades, pesca, etc..

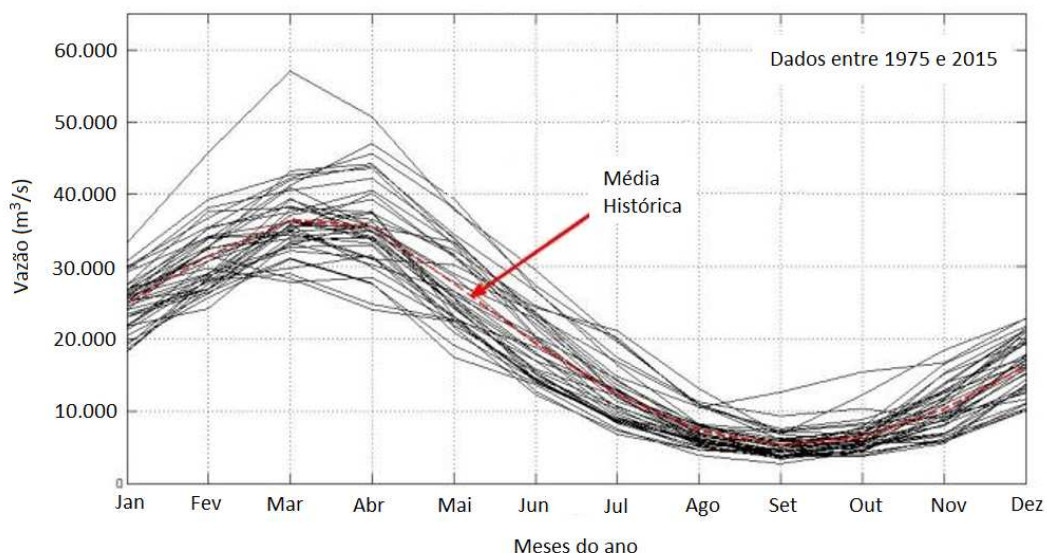


Figura 6 - Vazão do Rio Madeira ao longo do ano em (m^3/s) nas proximidades de Porto Velho onde se encontram usinas de Jirau e Santo Antônio (Guedes e Pinto Junior, 2016).



Figura 7 – Vista da usina hidrelétrica de Itaipu mostrando o vertedouro, as 20 unidades geradoras de 700 MW e o reservatório. A potência total instalada é 14000 MW.

Os impactos ambientais e sociais devido às usinas hidrelétricas são: formação de grandes represas, perda de água devido a evaporação, emissão de gases do efeito estufa como metano (CH_4) e carbono (CO_2), mudança do uso da terra e realocação de populações. A emissão de gases do efeito estufa devido a hidrelétricas é de forma indireta em seu ciclo de vida. A construção das barragens exige uma quantidade grande de cimento que na sua produção libera muito CO_2 . Adicionalmente, as barragens tendem a favorecer a decomposição de matéria orgânica e eventual produção e liberação de metano. Em regiões com densa vegetação como a Amazônia a emissão de gases do efeito estufa por hidrelétricas é quase tão elevada quanto em usinas a gás natural (Faria et al., 2015). Em regiões mais áridas como o Nordeste brasileiro a emissão é muito pequena. Grandes represas ocupam grandes áreas, impactam a biodiversidade local, alteram a economia local e deslocam populações ribeirinhas. Essas questões acompanham os projetos hidrelétricos brasileiros.

A Tabela 4 apresenta uma visão geral das usinas hidrelétricas brasileiras. O Brasil possui grandes, médias e pequenas usinas hidrelétricas.

Tabela 4 – Usinas hidrelétricas do Brasil em funcionamento e em construção em função da potência instalada.

■	Itaipu – 14200 MW – rio Paraná
■	Tucuruí – 8370 MW – rio Tocantins
■	Usinas hidrelétricas médias - inúmeras
□	100 MW < P < 2000 MW
■	Pequenas hidrelétricas (PCH) P < 50 MW – inúmeras
■	Em construção
□	Santo Antônio – 3150 MW – rio Madeira
□	Jirau – 3300 MW – rio Madeira
□	Belo Monte – 11233 MW – rio Xingu

4.2. Potencial eólico brasileiro

As usinas eólicas tornaram-se competitivas ao longo dos últimos 20 anos com o desenvolvimento de turbinas eólicas, eletrônica de potência e sistemas de controle automáticos. De forma semelhante à energia hidrelétrica a energia eólica é sazonal e varia ao longo do ano. Para a geração eólica eficiente seria necessário vento constante com velocidade elevada (entre 7 e 10 m/s) e sem mudanças de direção. A potência de geração eólica é proporcional ao cubo da velocidade do vento e a área varrida pelas pás da turbina. Assim, pequenas variações de velocidade do vento causam grandes variações na geração de potência (Twidell e Weir, 2006). Como a velocidade do vento varia muito ao longo de períodos curtos como 1 dia ou 1 hora, dizemos que a geração eólica é, também, intermitente. O fator de capacidade médio de usinas eólicas depende de vários fatores como a velocidade do vento,

turbulência, variabilidade ou intermitência e mudança de direção. Normalmente varia entre 10 e 35 %.

A Figura 8 apresenta uma turbina eólica. Seus principais componentes são a fundação, a torre, o conjunto rotor e gerador, as pás e a eletrônica de potência e sistemas de instrumentação e controles associados. Os sistemas de controle e instrumentação, engrenagens e gerador encontram-se encapsulados em uma caixa denominada “nacelle”. As turbinas eólicas são instaladas em regiões com ventos adequados. As grandes turbinas eólicas podem gerar de 1 a 3 MW. Um parque eólico pode ter até centenas de turbinas instaladas e ocupam grandes áreas.

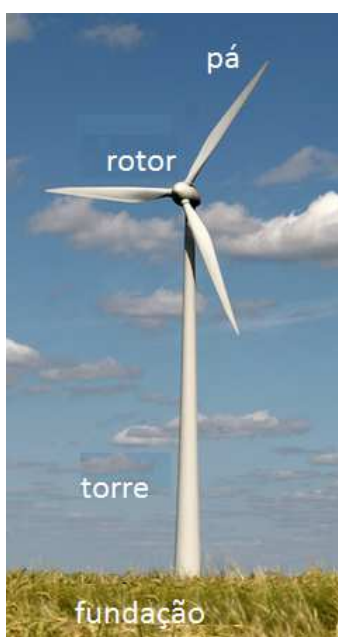


Figura 8 – Rotor eólico ou aerogerador.

A Figura 9 apresenta o mapa eólico brasileiro coletado a 50 m de altura. Observa-se a sazonalidade deste tipo de geração. Entre dezembro e maio a geração eólica é baixa, devido aos ventos com baixa velocidade. Entre junho e novembro a geração eólica pode ser mais elevada devido aos ventos com maior velocidade. A região central do Brasil e a região NE tem um potencial eólico elevado.

A Tabela 5 apresenta o potencial eólico em várias regiões brasileiras considerando ventos tomados a 50 m de altura com velocidade acima de 7 m/s. A tabela apresenta a velocidade média dos ventos, a área da região com tais ventos, o total de potência que pode ser instalada, o fator de capacidade na região e a energia que pode ser gerada em (TWh/ano). A potência nominal dos parques eólicos é dada pela sua potência de geração máxima. Observe que o fator de capacidade aumenta para velocidades de vento maiores atingindo 35 %. Para velocidades de vento menores que 7 m/s o fator de capacidade é reduzido, fica entre 13 % e 17 %, e a geração eólica perde economicidade. Note que o potencial eólico no Nordeste é

muito elevado e que o total brasileiro estimado para ventos acima de 7 m/s (272,1 TWh/ano) também é muito relevante. É aproximadamente a metade do consumo brasileiro de eletricidade em 2015.

Os impactos ambientais e sociais diretos da geração eólica estão ligados à grande área ocupada pelos parques eólicos. Os principais impactos ambientais são colisão de pássaros e ruído produzido pelos geradores. Os impactos sociais são visuais ou cênicos e uma relativa limitação ao uso do solo onde estão localizadas as turbinas eólicas.

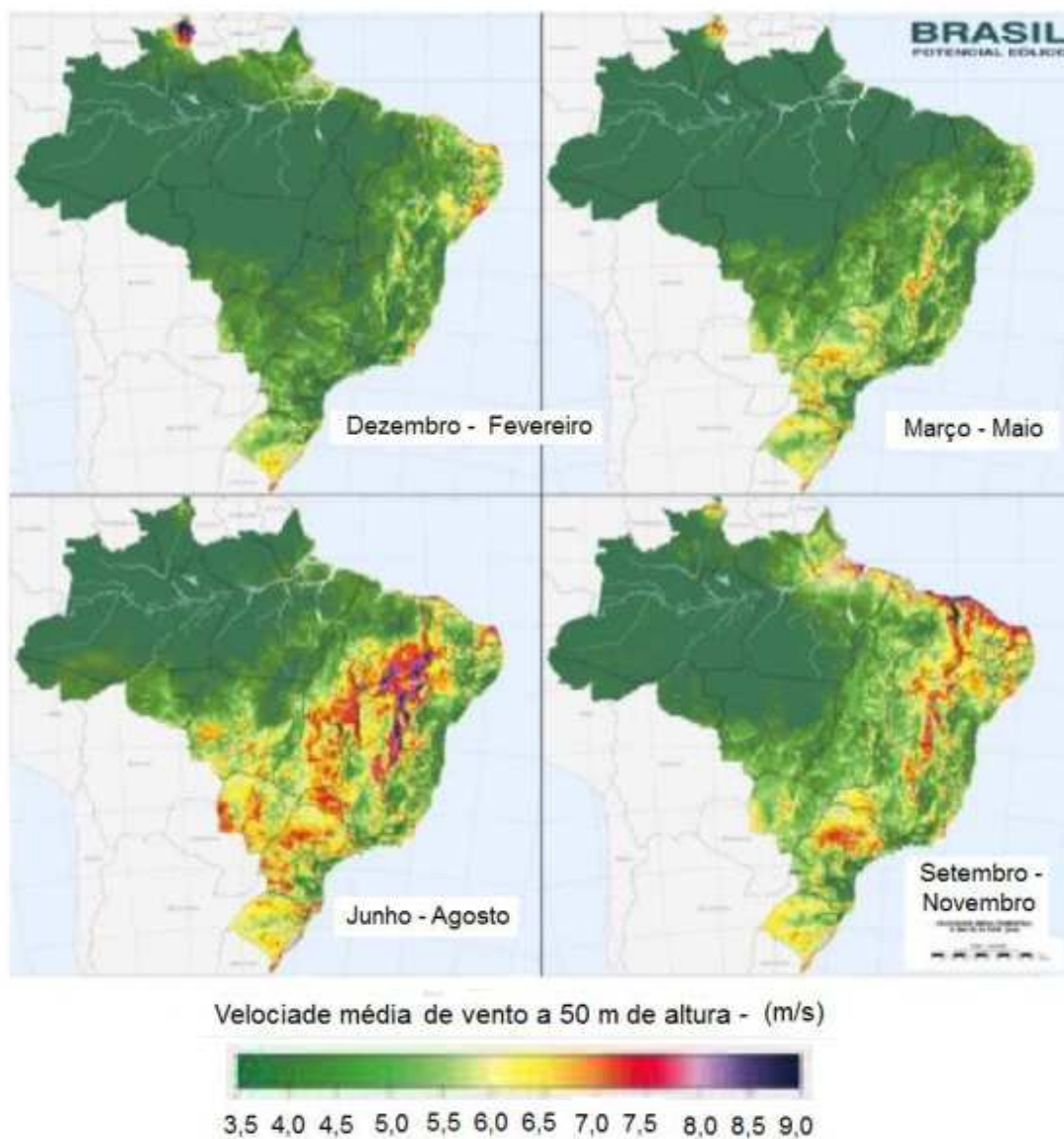


Figura 9 – Mapa eólico brasileiro para a altura de 50 m (Amarante et al., 2001).

Tabela 5 – Potencial eólico brasileiro e fator de capacidade estimado para ventos medidos a 50 m de altura* (Amarante et al., 2001).

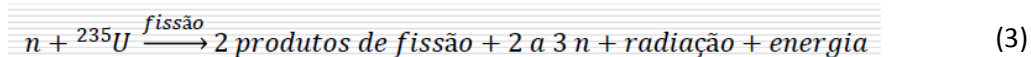
REGIÃO (energia anual)	VENTO [m/s]	ÁREA [km ²]	POTÊNCIA INSTALÁVEL [GW]	FATOR DE CAPACIDADE	ENERGIA ANUAL [TWh/ano]
Norte (26,4 TWh/ano)	7 - 7,5	3300	6,60	0,20	11,33
	7,5 - 8	1666	3,33	0,25	7,15
	8 - 8,5	903	1,81	0,30	4,65
	>8,5	551	1,10	0,35	3,31
Nordeste (144,3 TWh/ano)	7 - 7,5	24383	48,77	0,20	83,73
	7,5 - 8	9185	18,37	0,25	39,43
	8 - 8,5	3088	6,18	0,30	15,91
	>8,5	870	1,74	0,35	5,23
Centro-oeste (5,4 TWh/ano)	7 - 7,5	1395	2,79	0,20	4,79
	7,5 - 8	140	0,28	0,25	0,60
	8 - 8,5	6	0,01	0,30	0,03
	>8,5	0	0,00	0,35	0,00
Sudeste (54,9 TWh/ano)	7 - 7,5	11545	23,09	0,20	39,64
	7,5 - 8	2433	4,87	0,25	10,44
	8 - 8,5	594	1,19	0,30	3,06
	>8,5	297	0,59	0,35	1,78
Sul (41,1 TWh/ano)	7 - 7,5	9436	18,87	0,20	32,40
	7,5 - 8	1573	3,15	0,25	6,75
	8 - 8,5	313	0,63	0,30	1,61
	>8,5	57	0,11	0,35	0,34

* A título de comparação, o consumo total de energia elétrica no Brasil em 2015 foi em torno de 550 TWh.

4.3. Reservas de urânio do Brasil – energia nuclear

O urânio natural tem 2 isótopos principais, o ^{238}U com ocorrência de 99,3 % na natureza e o ^{235}U com ocorrência de 0,7 %. O ^{235}U pode ser fissionado com nêutrons térmicos (energia em torno de 0,05 eV) produzindo 200 MeV de energia, produtos de fissão, radiação e 2 a 3

nêutrons que podem ser utilizados para fazer novas fissões (reação de fissão em cadeia). A reação de fissão que ocorre em reatores nucleares como Angra 1 e Angra 2 é



Portanto, o ${}^{235}\text{U}$ é o isótopo importante na energia nuclear.

O urânio é extraído, purificado e concentrado na forma de um sal de cor amarela conhecido como “yellow cake”. Após o beneficiamento obtém-se um óxido de fórmula U_3O_8 . No Brasil a mineração e beneficiamento do urânio ocorre em Caetité no sul da Bahia. As reservas de U_3O_8 somam 309 mil toneladas e correspondem a 5,9 % das reservas mundiais. A Figura 10 apresenta uma vista aérea das instalações de mineração de urânio em Caetité, BA e um trabalhador realizando ações próximo a um tambor de yellow cake. O urânio encontrado na natureza é um material radioativo que emite radiações alfa e gama. Após a concentração deste material o nível de radioatividade torna-se elevado e requer cuidados especiais, especialmente para evitar a inalação ou ingestão do pó deste material.

A produção anual urânio em Caetité é de 400 t/ano e atende à demanda de urânio das centrais nucleares de Angra 1 e Angra 2. Esta quantidade de urânio pode gerar 70 MW de eletricidade continuamente durante 30 anos. Note que em 2015 o Brasil já gera continuamente um pouco menos que esta quantia. O combustível nuclear que alimenta os reatores nucleares vem na forma de pastilhas de UO_2 com urânio enriquecido. O enriquecimento do urânio é um processo físico que aumenta a proporção de ${}^{235}\text{U}$ do valor natural para valores entre 2 e 5 % para tornar viável a reação de fissão em cadeia.



Figura 10 – Instalações de mineração de urânio da INB (Indústrias Nucleares do Brasil) em Caetité, BA. Ao lado vê-se um trabalhador e um tambor com “yellow cake” (INB, 2016).

Os produtos da Equação 3 são importantes. A energia liberada pela reação nuclear de fissão é muito elevada. Enquanto uma reação de combustão de um átomo de carbono libera em torno de 3 eV, a fissão de um núcleo de ${}^{235}\text{U}$ libera 200 milhões de eV. O combustível

nuclear tem uma grande densidade energética. Esta energia é aproveitada na forma de calor. Um reator nuclear, como os existentes no Brasil e mostrado na Figura 11, utiliza este calor para gerar vapor que movimenta uma turbina a vapor e gera eletricidade. Os centros de transformação de energia primária nuclear em energia elétrica exigem uma cadeia mais complexa: mineração do urânio, seu beneficiamento, fabricação do combustível nuclear que será utilizado na usina nuclear e usina nuclear propriamente dita.

Uma usina nuclear não emite gases do efeito estufa durante sua operação. Devido a isto ela é considerada uma fonte de energia limpa. A energia nuclear também não ocupa grandes áreas porque tem uma densidade energética elevada.

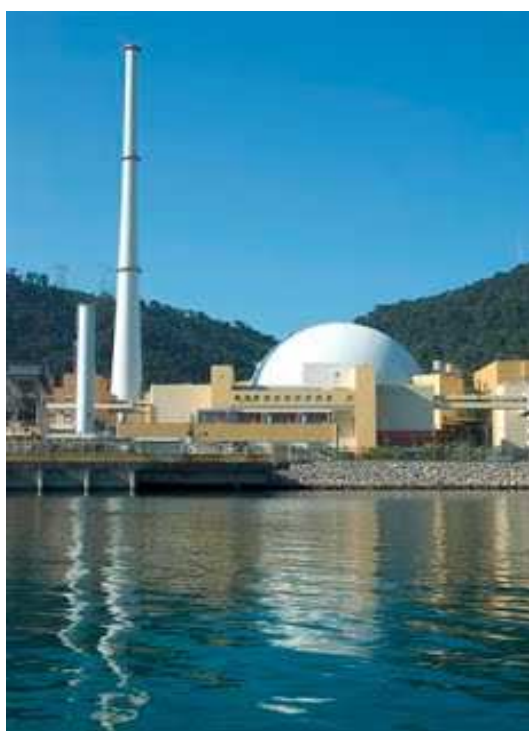


Figura 11 – Usina nuclear de Angra 2 na costa do Estado do Rio de Janeiro (Eletronuclear, 2016).

Os produtos de fissão são materiais radioativos ou resíduos nucleares. Outro material produzido nos reatores nucleares pela reação de captura de nêutrons pelo ^{238}U é o ^{239}Pu (plutônio). Este material também é um combustível nuclear semelhante ao ^{235}U e pode gerar energia. Os produtos de fissão que podem ser utilizados na indústria ou na medicina nuclear e o ^{239}Pu devem ser reciclados para uso pela sociedade. O material restante constitui os rejeitos radioativos e deve ser armazenado adequadamente. Para proteger o ser humano da radiação os reatores nucleares e os depósitos de rejeitos radioativos são projetados com blindagens.

A reciclagem do plutônio aumenta bastante o potencial de geração da energia nuclear. Idealmente, com reatores eficientes, o potencial pode aumentar em dezenas de vezes .

Os impactos ambientais e sociais estão ligados à radioatividade dos resíduos nucleares. A emissão de gases do efeito estufa é muito pequena, ocorre de forma indireta durante a construção da usina, que também exige muito cimento, e nos processos de fabricação de combustível. A quantidade de rejeitos radioativos é pequena devido à alta densidade energética do urânio, mas devido à radiação requer cuidados especiais. Esses rejeitos não são liberados para o meio ambiente, ao contrário, são armazenados em condições apropriadas para a proteção humana e do meio ambiente. Os rejeitos radioativos de baixo nível devem ser armazenados por 30 anos; os rejeitos radioativos de médio nível devem ser armazenados por até aproximadamente 300 anos e os rejeitos de alto nível, por mais de 10.000 anos. A quantidade de rejeitos de alto nível gerada em 3 anos por uma usina nuclear de 1000 MW, que requer armazenagem durante milhares de anos, é de cerca de 34 toneladas (Moreira, 2016). A título de comparação, usinas a gás natural ou carvão gerando a mesma quantidade de eletricidade liberam milhões de toneladas de CO₂ para a atmosfera. Contudo, se esses rejeitos radioativos forem reciclados em reatores rápidos, ou mesmo em reatores a água leve como os de Angra, os rejeitos remanescentes se transformariam em rejeitos de médio nível (Moreira et al., 2016).

4.4. Potencial de biomassa

A biomassa é qualquer matéria orgânica que pode ser convertida em energia mecânica, térmica ou elétrica. Ela pode ser florestal (madeira), agrícola (cana de açúcar, arroz, soja, palmas, mamona, etc.) e rejeitos urbanos residenciais e industriais (lixo entre outros). Os processos típicos de aproveitamento são a combustão e processos agroindustriais modernos para a geração de combustíveis líquidos e eletricidade. Nesse caso a indústria da biomassa exige grandes plantações como de arroz, soja, milho ou cana de açúcar que formam a matéria prima. O aproveitamento energético da cana de açúcar advém do suco, do bagaço e da palha para gerar etanol e eletricidade, respectivamente. Do arroz e soja, que são alimentos, aproveita-se a palha gerada após o beneficiamento. Os resíduos sólidos urbanos geram biogás ou podem ser incinerados, a lenha oriunda de florestas é utilizada para gerar calor industrial, etc (Twidell e Weir, 2006)

As tecnologias utilizadas para gerar energia a partir da biomassa são variadas. As principais são combustão direta para a obtenção de calor; a pirólise ou carbonização para aumentar a densidade energética da biomassa, como por exemplo, a produção de carvão a partir da lenha que tem poder calorífico duas vezes maior que o insumo; a gaseificação por reações termoquímicas de combustíveis sólidos que geram combustíveis gasosos mais eficientes e práticos de se usar; a digestão anaeróbica de resíduos orgânicos para a geração de biogás que contém CO₂ e CH₄; a fermentação que é utilizada na agroindústria sucroalcooleira para a produção de etanol; e a transesterificação, utilizada para a produção de biodiesel.

A biomassa é um recurso natural renovável, enquanto os combustíveis fósseis não se renovam na escala temporal do homem. Parte da energia contida na biomassa é empregada pelo ecossistema para sua própria manutenção e reprodução. A utilização da biomassa eventualmente provoca a liberação de CO₂ para a atmosfera, mas este composto é

previamente absorvido para a constituição das plantas. O balanço de emissões de CO₂ é, portanto, nulo.

O potencial de geração de biomassa depende da disponibilidade de tecnologia e condições agrícolas para vasta produção de biomassa. A Figura 12 mostra a produção moderna de biomassa sendo a colheita feita de forma mecanizada e a Figura 13 mostra uma usina de etanol em Sertãozinho, SP, baseada na tecnologia de fermentação. As regiões de clima tropical e subtropical (entre os trópicos de Capricórnio e de Câncer) são as áreas mais apropriadas para a produção de culturas energéticas, mas há produção também em regiões de clima temperado.

O Brasil apresenta condições interessantes para a produção de biomassa devido ao clima, disponibilidade de grandes áreas para as plantações e a possibilidade de produzir etanol da cana de açúcar. Esta biomassa é bastante produtiva para a produção de biocombustível.



Figura 12 – Produção de biomassa em grandes plantações (ANEEL, 2006).



Figura 13 – Exemplo de um centro de transformação de biomassa - usina de etanol em Sertãozinho, SP.

A Figura 14 mostra a razão entre a energia produzida pelo a e energia consumida no processo de produção de vários biocombustíveis. Note que a cana de açúcar proporciona 8 unidades de energia para 1 unidade consumida no processo de produção do etanol enquanto a beterraba, o milho e o trigo proporcionam menos que 2 unidades. A Figura 15 apresenta a produção anual de biocombustíveis (maior parte de etanol e biodiesel) em vários países do mundo. O Brasil é o segundo maior produtor mundial. O biocombustível é utilizado puro ou misturado em veículos para a redução da emissão de gases do efeito estufa e reduzir a poluição nas cidades.

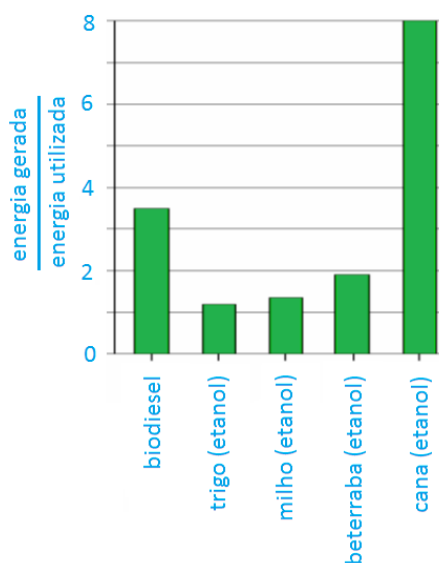


Figura 14 – Razão entre energia gerada e energia utilizada no processo de produção de biocombustível para várias matérias primas. Milho é utilizado como matéria prima nos EUA, beterraba na União Europeia e cana de açúcar no Brasil (ref).

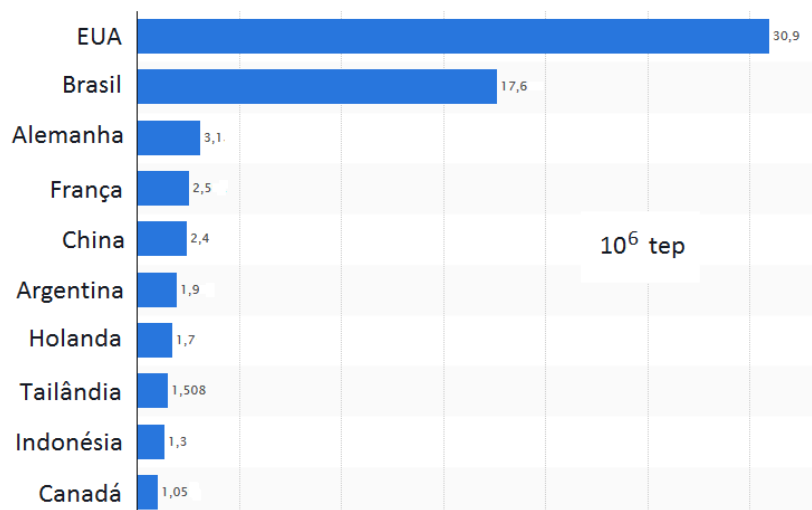


Figura 15 – Produção anual de biocombustível em 2015 expressa em tep (STATISTA, 2016).

Os principais impactos ambientais e sociais da biomassa são: imobilização de grandes áreas para a produção da biomassa, uso intensivo do solo, consumo de água, perda de biodiversidade devido a monocultura, emissão de poluentes como monóxido de carbono e particulados na atmosfera e consumo de água. Embora emita CO_2 a biomassa é neutra quanto a emissão de gases do efeito estufa porque ela é produzida pelo processo de fotossíntese que consome este gás tomando-o da atmosfera.

4.5. Potencial de energia solar

A energia solar é a fonte de várias formas de energia primária no planeta. O sol movimenta a cadeia hidrológica que abastece os rios, movimenta os ventos, provê por meio da fotossíntese a energia necessária para a formação da biomassa e proveu no passado longínquo a energia para a formação das fontes fósseis a partir da matéria orgânica como carvão e petróleo. A fonte solar também proporciona à sociedade energia térmica e fotovoltaica. O fluxo de radiação solar no topo da atmosfera, denominado constante solar, é 1360 W/m^2 , com uma distribuição espectral de comprimento de onda típica de um corpo negro emitindo radiação a 6000 K. Até atingir o solo da Terra parte da radiação é absorvida ou refletida de volta ao espaço pelas moléculas existentes na atmosfera. Assim, o fluxo na superfície da Terra é menor e depende do grau de umidade e nebulosidade da região, estação do ano, varia durante o dia e cai a zero durante a noite.

A incidência na superfície do planeta também varia com a latitude de forma que reduz em direção aos polos. A Figura 16 mostra o fluxo de radiação solar na superfície do Brasil. No hemisfério sul, os coletores solares devem ser posicionados virados para o Norte e ângulo de inclinação semelhante à da latitude local. Embora a quantidade de energia solar incidente na Terra seja imensa o fluxo de energia é relativamente pequeno (menos de 1 kW em cada m^2 – lembre-se que um chuveiro elétrico consome cerca de 3 kW).

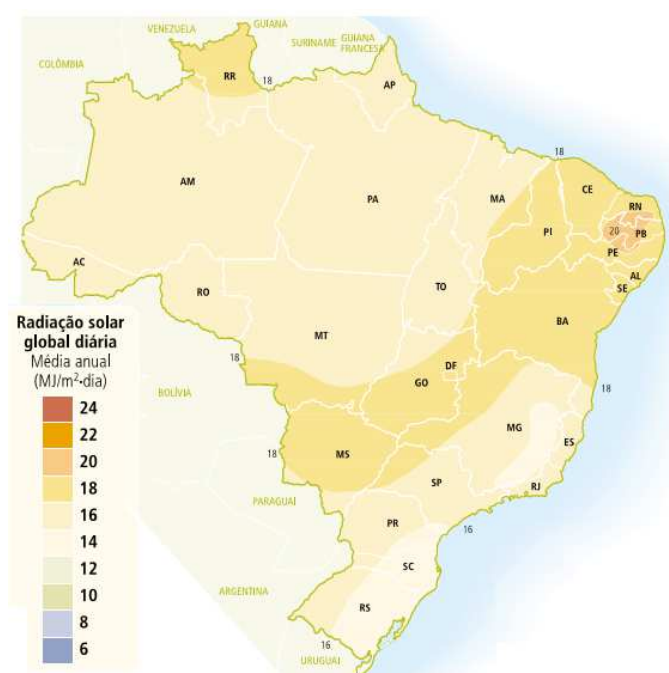


Figura 16 – Fluxo de radiação solar no Brasil (UFPE, 2000).

As tecnologias de aproveitamento da energia solar são os coletores térmicos, concentradores heliotérmicos e painéis fotovoltaicos. Os coletores térmicos podem ser usados em residências para o aquecimento de água e são normalmente instalados nos telhados ou paredes onde há forte incidência de radiação. As temperaturas atingidas pela água são menores que 100 °C devido ao baixo fluxo de radiação solar. Os concentradores heliotérmicos buscam aumentar o fluxo de radiação em um local para obter aquecimentos elevados. A radiação é coletada em uma grande área e refletida para um ponto focal e ali concentrando grande densidade de potência. Neste local esta potência permite a produção de vapor e geração de eletricidade por meio de ciclos térmicos.

A Figura 17 mostra um aquecedor solar de água para uma residência disponível no mercado. O coletor solar deve ter uma superfície escura para transformação da radiação solar em calor. Dentro do coletor passa uma serpentina para promover o aquecimento da água. Esta pode ser armazenada em um reservatório termicamente isolado e prover água quente durante a noite quando não há energia solar disponível. O código de obras brasileiro já requer aquecedores solares como uma das instalações obrigatórias para novas residências. A Figura

18 mostra um conjunto residencial com aquecedores solares no telhado das casas. O aquecimento de água quente em chuveiros elétricos no Brasil consome praticamente a potência gerada por toda a usina de Itaipu. Estes sistemas de aquecimento de água via energia solar constituem-se em uma grande contribuição para a eficiência energética no Brasil.



Figura 17 – Sistema solar para aquecimento de água que pode ser instalado no telhado de uma residência (SOLARESOL, 2016).



Figura 18 – Conjunto residencial com aquecedores solares instalados no telhado de suas unidades (SOLETROL, 2016).

A terceira tecnologia, sistemas fotovoltaicos, permite a geração direta de eletricidade. Em alguns materiais semicondutores a base de silício (Si) os elétrons recebem energia dos fótons solares e se movem para a banda de condução gerando uma corrente e uma tensão de

alguns volts, isto é, geram eletricidade. Esses materiais são organizados em células e conectados em série e em paralelo, formando painéis fotovoltaicos, para fornecerem tensões e correntes mais elevadas (Twidell e Weir, 2006). Um painel comercial típico tem aproximadamente 1 m^2 , pesa pouco mais de 10 kg, é feito de 36 células solares capazes de produzir cerca de 17 volts em corrente contínua e uma potência de até 140 Watts. Os modelos geralmente variam de 5 até 300 Watts de potência (NEOSOLAR, 2016). Os painéis fotovoltaicos devem ser instalados voltados para o Sol para coletar a maior quantidade possível de radiação. A eficiência de conversão de energia solar em eletricidade é normalmente inferior a 25 %, mas pesquisas continuam a melhorar este índice (Twidell e Weir, 2006).

A energia solar fotovoltaica tem o potencial de gerar a energia elétrica para todas as residências do Brasil a partir de painéis instalados nos telhados das casas. A Figura 19 mostra uma casa com um painel fotovoltaico que pode gerar eletricidade para seu consumo e potencialmente transmitir para a rede elétrica o excedente. A figura também mostra a instalação de painéis fotovoltaicos em um galpão industrial. Uma dificuldade para a inserção de energia fotovoltaica na matriz elétrica é o seu custo ainda elevado de instalação. Contudo, pesquisas e ganhos de escala industrial continuam a baixar o custo desta tecnologia.



Figura 19 – Residência com painéis fotovoltaicos para geração de eletricidade e instalação de painéis fotovoltaicos em um galpão industrial no ABC paulista (NEOSOLAR, 2016; BIOENERGIA, 2016).

A capacidade de gerar energia em pequenas unidades (residências) em quantidade superior ao consumo nas unidades torna as residências fontes de eletricidade distribuídas pelo sistema elétrico. Na Figura 3 vê-se que a eletricidade é gerada em grande quantidade em uma usina hidrelétrica e é transmitida e distribuída pelas cidades. No caso da fonte distribuída, a geração pode ocorrer nas unidades consumidoras das cidades e do setor rural. Uma usina de 700 MW pode prover eletricidade para uma cidade de 1,5 milhão de habitantes (ITAIPU, 2016). No caso da geração distribuída fotovoltaica, as residências da cidade poderiam gerar a energia consumida pelos seus habitantes!

A introdução da geração distribuída fotovoltaica impõe uma mudança estrutural no setor elétrico. As unidades consumidoras se transformam em unidades micro e mini geradoras de eletricidade. Será necessário medir o consumo de eletricidade nas residências e também a eletricidade gerada e injetada na rede. O residente passa a pagar pela eletricidade consumida e também receber pela eletricidade gerada. Adicionalmente, a inclusão de inúmeras unidades requer um controle inteligente da rede elétrica para manter a qualidade da energia gerada (*smart grids*). Pode haver a organização de grupos de residências formando um pool de geração e ganhando escala e competitividade no mercado! Estas possibilidades já ocorrem no Brasil de forma incipiente, mas devem aumentar de forma relevante a partir do estabelecimento de uma regulamentação apropriada (EPE, 2014).

O potencial de geração fotovoltaica distribuída depende da energia solar disponível, da área de telhados disponível para a instalação dos painéis e da eficiência na conversão da radiação solar em eletricidade. A Figura 18 apresenta o potencial de geração fotovoltaica nas residências. Os dados para obter o potencial vieram de atlas de radiação solar no Brasil e o censo demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. As áreas das residências que recebem insolação dependem da configuração espacial e da localização. Para casas considerou-se uma área de telhado média de 85 m² e para apartamentos, 15 m². Considerou-se que desta área total somente 30 % teria uma insolação adequada. Quanto a eficiência de conversão da radiação solar em eletricidade, considerou-se um valor médio de 12 % (EPE, 2014). Regiões com grandes fluxos de energia solar e grandes áreas de telhados têm grande potencial de geração distribuída fotovoltaica.

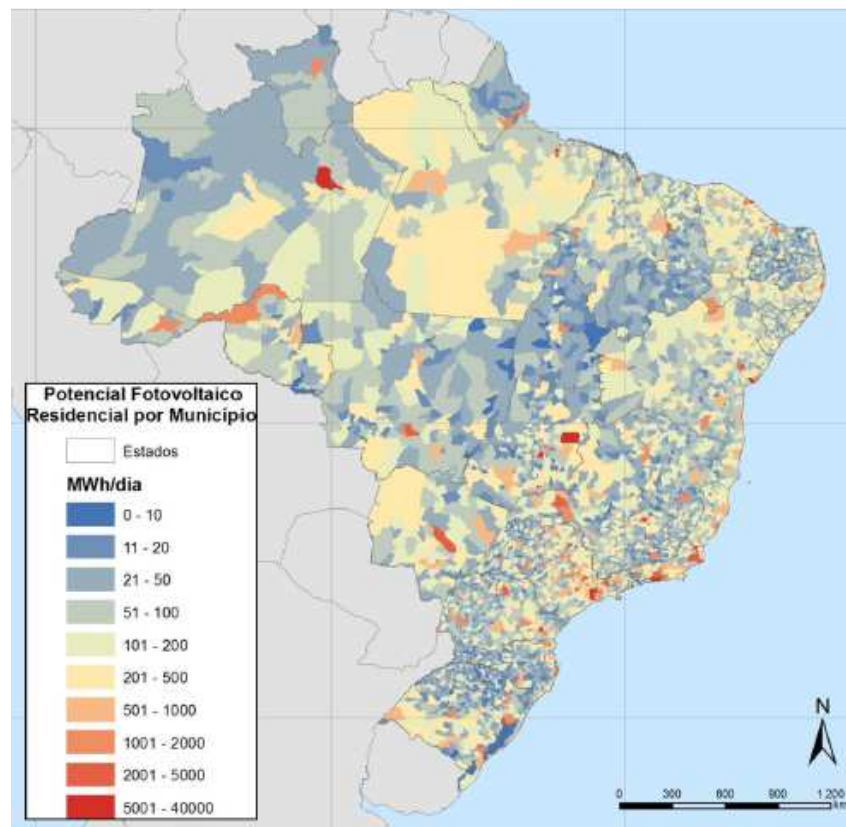


Figura 18 – Potencial fotovoltaico para geração residencial por município do Brasil (EPE, 2014).

Os impactos ambientais da geração solar são a imobilização de grandes áreas ocupadas com painéis solares e indiretos relativos a cadeia produtiva para a produção das células fotovoltaicas. Outra questão importante é a disposição desses painéis após sua vida útil. No caso de utilização de telhados de casas para a instalação de painéis solares a questão de imobilização de áreas deixa de existir.

4.6. Potencial de recursos fósseis

Os recursos naturais de fontes fósseis de energia são petróleo, carvão e gás natural. Esses recursos são não renováveis ou exauríveis. Recursos energéticos são quantidades de minérios, líquidos ou gás que podem ser utilizados pela sociedade como energia primária. Os recursos energéticos são prospectados, recuperados ou extraídos e consumidos. Reservas são recursos bem conhecidos por meio de prospecção e que podem ser recuperados a preços e tecnologias atuais. As reservas variam ao longo do tempo, pois dependem do esforço de prospecção e extração e também da taxa de consumo. Classificam-se as reservas como comprovadas, indicadas ou inferidas, de acordo com o grau de certeza sobre seus volumes e a possibilidade ou não de extração com as tecnologias disponíveis. As reservas comprovadas são exatamente a definição acima. As reservas indicadas são recursos recuperáveis de jazidas conhecidas e passíveis de extração a partir do melhoramento das técnicas de recuperação. As

reservas inferidas são depósitos em jazidas identificadas, porém não quantificadas, mas apenas estimadas.

As reservas também são dimensionadas em função do consumo dos países por meio do parâmetro duração da reserva. A duração das reservas de um energético, normalmente expressa em anos, é dada pela razão entre o volume de reservas comprovadas e a taxa de produção ou extração de petróleo,

$$\tau = \frac{\text{Reservas de petróleo (bp)}}{\text{taxa de extração de petróleo } (\frac{bp}{ano})} \text{ (anos)}. \quad (4)$$

À medida que a taxa de extração aumenta as reservas são consumidas. Assim τ representa quantos anos um país ou companhia possui de reservas de um energético se a taxa de extração atual for mantida constante ao longo do tempo. Por exemplo, os países procuram manter reservas de petróleo de cerca de 10 anos ao longo do tempo. Se o consumo aumenta e as reservas diminuem, os países investem mais em prospecção de novas reservas de petróleo para manter $\tau = 10$ anos!

Petróleo

O petróleo vem da conversão de matéria orgânica a alta temperatura e pressão de sedimentos ao longo de milhões de anos. Normalmente se encontra no subsolo da terra ou do mar em profundidades variadas. Em terra (on shore), os poços podem ter de 20 a 6000 m de profundidade. No mar (off shore), pode chegar a mais que 7000 m, como é o caso do pré-sal. O petróleo é uma mistura de óleo cru, gás natural, água em solução e semissólidos asfálticos pesados. É uma mistura complexa de hidrocarbonetos contendo em média 7 g de C para 1 g de H. Há compostos leves como o CH_4 até outros pesados com mais de 100 átomos de C. A densidade do óleo varia de 0,8 a 0,95 g/cm^3 sendo normalmente de cor preta. Os hidrocarbonetos perfazem 95 a 98 % da mistura e o restante contém oxigênio, nitrogênio, enxofre e traços de compostos organo-metálicos.

O petróleo é classificado segundo sua densidade (grau API) e também do ponto de vista comercial. O grau API (American Petroleum Institute) expressa a densidade do óleo. Como o óleo leve é mais interessante comercialmente, o grau API varia inversamente com a densidade:

- Leve – grau API acima de 30°
- Médio – grau API entre 22 e 30°
- Pesado – grau API entre 10 e 22°
- Extrapesado – grau API menor que 10°

Do ponto de vista comercial, a classificação se dá em relação à bolsa de mercadorias onde é comercializado:

- WTI (West Texas Intermediate) negociado em Nova York – petróleo com grau API entre 38 e 40°

- Brent (nome da antiga plataforma da Shell, Mar do Norte) negociado em Londres – petróleo com grau API de 39,4° e teor de enxofre de 0,34 %.

A Figura 20 mostra as reservas comprovadas de petróleo de vários países do mundo. Nota-se que a distribuição de petróleo não é uniforme no mundo e isto é causa de muitas guerras. As Figuras 21 e 22 apresentam a produção e o consumo anuais de vários países. O Brasil apresenta um consumo ligeiramente maior que a produção de petróleo. Embora utilizemos bastante energia renovável, somos o 6º país consumidor de petróleo no mundo. Boa parte da produção brasileira de petróleo já é oriunda do pré-sal.

O petróleo é comercializado internacionalmente e o Brasil foi um grande importador até meados do ano 2000. Em geral, os países do oriente médio são exportadores de petróleo por terem grandes reservas e baixo consumo.

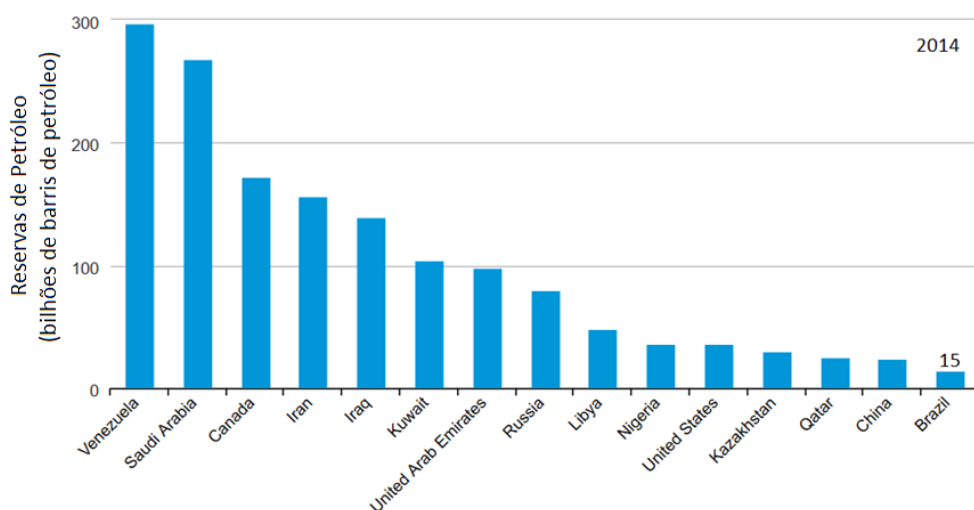


Figura 20 – Reservas de petróleo em bilhões de barris em 2014 (EIA, 2016)

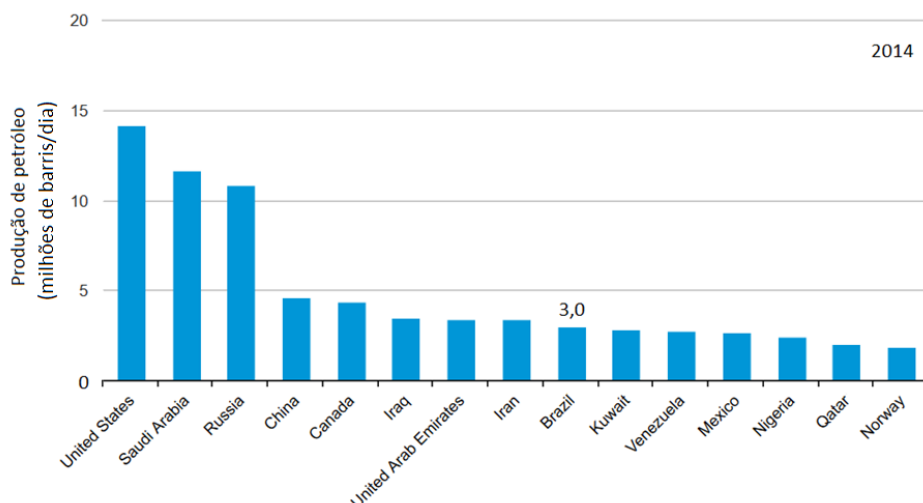


Figura 21 – Países que mais produziram petróleo e combustíveis líquidos no mundo em 2014 (EIA, 2016).

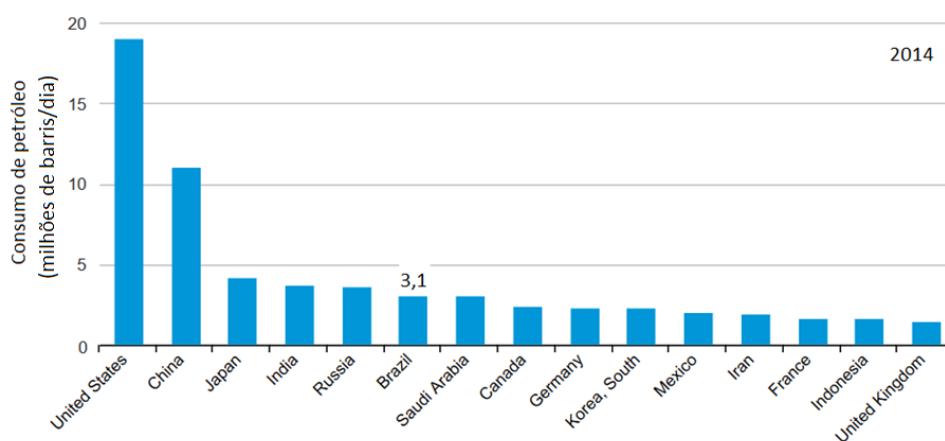


Figura 22 – Países que mais consumiram petróleo no mundo em 2014 (EIA, 2016).

A cadeia produtiva do petróleo também é complexa. A extração e o beneficiamento inicial do petróleo ocorrem nos chamados poços de petróleo ou em plataformas marítimas. A Figura 23 mostra uma plataforma marítima da Petrobras na costa do Rio de Janeiro. O centro de transformação para o petróleo é a refinaria onde se produz a energia de uso final para a sociedade, isto é, os derivados de petróleo. O refino de petróleo é um processo de destilação em uma torre de fracionamento de cerca de 40 m de altura. Os vários derivados de petróleo são condensados em diferentes alturas da torre. Os mais pesados são coletados na parte de baixo, os mais leves, na parte de cima e alguns gases são coletados no topo da torre. Os principais produtos do refino são a gasolina bruta (automotiva e de aviões), querosene bruto, gasóleo, composto de gases de hidrocarbonetos, óleo combustível, óleo lubrificante, parafinas

e a fração pesada de coque e asfalto. Há mais de 1 dezena de refinarias no Brasil distribuídas pelas regiões Norte, Nordeste, Sudeste e Sul (PETROBRAS, 2016a). A Figura 24 mostra a refinaria de petróleo Gabriel Passos em Minas Gerais. As instalações da cadeia do petróleo são grandes e complexas.



Figura 23 – Plataforma de petróleo P-55 da Petrobras no litoral de Campos, RJ (PETROBRAS, 2016a)

Gás Natural

O gás natural é uma mistura de gases com predominância de CH_4 . É formado de maneira semelhante ao petróleo e ocorre associado a ele ou em poços contendo somente gás. Pode também originar das profundezas da terra e neste caso não teria uma origem biológica. As reservas mundiais principais são mostradas na Figura 25. No Brasil grande parte do gás natural ocorre associada ao petróleo, como na plataforma continental, mas também em poços de gás, como em Urucua no Amazonas. As reservas de gás natural no Brasil são pequenas comparadas com a de outros países no mundo. Há fontes de gás natural nos estados do Rio de Janeiro, Espírito Santo, Rio Grande do Norte e Amazonas.

O gás natural é um energético com vários usos finais. Ele pode ser utilizado para aquecimento doméstico, combustível de caldeiras, combustível de veículos, na indústria e geração de eletricidade. Ele é transportado por gasodutos ou na forma líquida (gás liquefeito) em navios criogênicos transoceânicos e costeiros.



Figura 24 – Refinaria de Gabriel Passos em Betim, MG (PETROBRAS, 2016b).

Parte do gás que consumimos é importado da Bolívia conforme mostra a Figura 26. O gasoduto TBG transporta gás natural da Bolívia até ao Rio Grande do Sul e também ao Rio de Janeiro. Nesta figura é mostrada também a rede de transporte de gás existente no Brasil em 2015. Há um longo gasoduto entre Vitória (ES) até Pecem (CE), outro entre Urucuia (AM) e Manaus (AM) e entre a Bolívia e Cuiabá (MT). Os grandes consumidores de gás natural encontram-se ao longo dos gasodutos, sejam eles usinas termelétricas a gás natural, cidades ou indústrias.

A quantidade de gás natural pode variar dentro do gasoduto por meio do controle da pressão de bombeamento em segmentos do gasoduto. No caso do gasoduto TBG a sua sala de controle encontra-se na cidade do Rio de Janeiro, mais precisamente na Praia do Flamengo! Deste local o transporte e a distribuição de gás da Bolívia ao Rio Grande do Sul é controlada e também variações de quantidades são acomodadas no interior do gasoduto por meio da pressão adequada.

A Figura 27 mostra uma instalação de recebimento e distribuição de gás natural típica ao longo de um gasoduto. Na parte inferior mostra construção de um gasoduto no interior do Brasil.

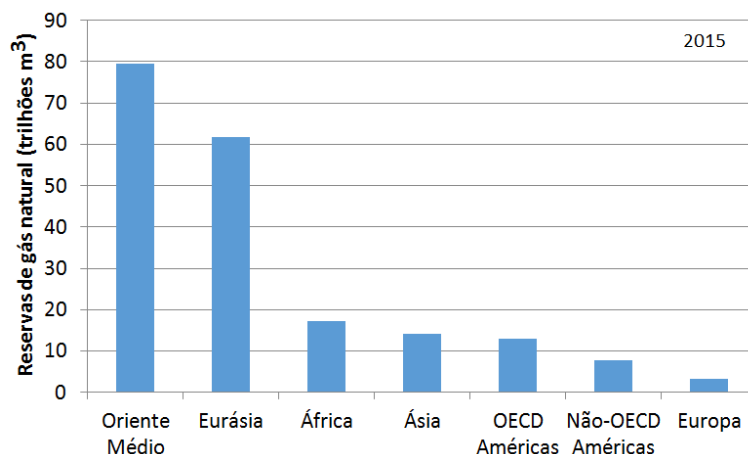


Figura 25 – Reservas de gás natural no mundo EM 2015. EUA, Canadá, México e Chile pertencem a OECD (Organização para a Cooperação Econômica e Desenvolvimento) (EIA, 2016).



Figura 26 – Rede de gasodutos no Brasil (GASNET, 2016).



Figura 27 – Instalação de recebimento e distribuição de gás natural e gasoduto em construção (ANP, 2016)

Carvão

O carvão é uma das mais importantes fontes primárias de geração de energia elétrica no mundo e também é responsável por emissão de gases de efeito estufa, mas tem pequena participação na matriz elétrica do Brasil. O carvão é formado a partir de material vegetal acumulado em pântanos há milhões de anos. A turfa formada é compactada ao longo dos anos e forma veios de carvão. Necessita-se cerca de 20 m de vegetal para se formar 1 m de carvão. O poder calorífico aumenta com o teor de carbono presente. O carvão é classificado de acordo com seu teor de carbono: linhito (30 % de carbono), sub-betuminoso (40 %), betuminoso (50 a 70 %) e antracito (90 % de carbono). O carvão betuminoso e o antracito são os mais econômicos e utilizados. O carvão existe em grande abundância em vários países conforme mostra a Figura 28. Cerca de 70 % das reservas mundiais se concentram em alguns países que são grandes emissores de gases do efeito estufa, pois o utilizam para a geração de energia elétrica.

A Figura 29 mostra uma termelétrica a carvão no Rio Grande do Sul, próxima a região carbonífera brasileira. A grande torre cônica ao fundo é o trocador de calor que rejeita o calor no ciclo térmico da planta para o meio ambiente. A fumaça branca que emana dessas torres é apenas vapor d'água. As emissões ocorrem pelas chaminés ao lado.

Os impactos ambientais das fontes fósseis são importantes. A mineração de carvão afeta uma área grande e pode causar contaminação da água na região adjacente. Atualmente, a área afetada pela mineração é remediada após o término da exploração do carvão visando voltar à condição inicial. Quanto a poluição do ar temos emissão de SO_2 e SO_x , emissão de NO_x e CO (monóxido de carbono), emissão de particulado na atmosfera (fuligem) e metais pesados.

As usinas a carvão emitem gases do efeito estufa que podem causar mudanças climáticas (emissão de CO₂). Também produzem chuva ácida devido a formação dos ácidos sulfúrico e nítrico na atmosfera a partir da reação do SO_x e NO_x emitidos com o vapor d'água da atmosfera.

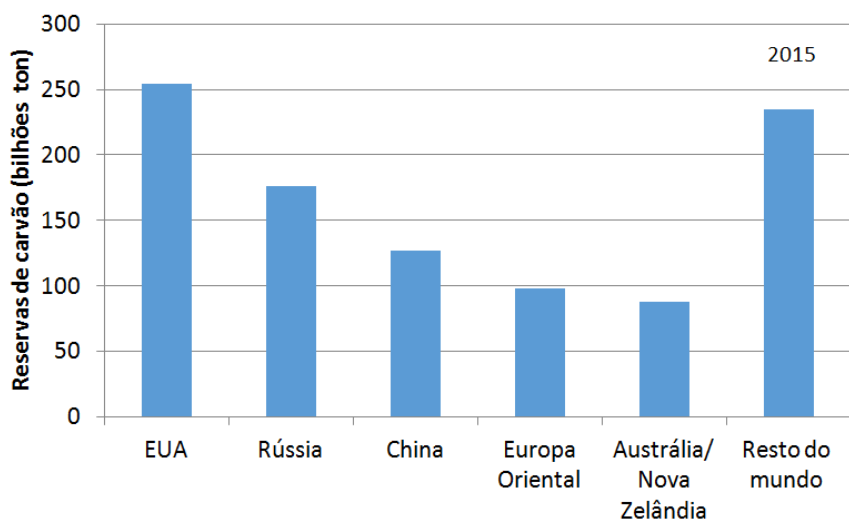


Figura 28 – Reservas de carvão no mundo em 2015 (EIA, 2016).



Figura 29 – Complexo termelétrico de Candiota, RS (CGTEE, 2016).

5. Comentários finais

A matriz energética brasileira é atualmente bastante diversificada. Na década de 70 ela era bem mais simples. A eletricidade era gerada basicamente por hidrelétricas e os

combustíveis líquidos eram basicamente derivados de petróleo. Atualmente temos cerca de 30 % da geração de eletricidade oriundas de fontes primárias como gás natural, carvão, urânio, biomassa, eólica e solar. Já os combustíveis líquidos contam com importante contribuição do etanol e também do biodiesel.

A sociedade deve procurar usar a energia da forma mais eficiente possível e poupar energia primária. A geração, transporte, distribuição e uso da energia formam uma cadeia muito complexa e tecnológica e causam impactos ambientais variados em cada uma das etapas. Assim os centros de transformação e as tecnologias de uso final da energia devem ser melhorados para serem mais eficientes.

As fontes de energia primária e as tecnologias de transformação e uso de energia evoluíram durante a história da humanidade e devem continuar a fazê-lo. Esta evolução, como no passado, depende de novos desenvolvimentos científicos e tecnológicos. Assim, todas as alternativas devem ser consideradas e estudadas.

Referências

- Amarante, O. A. C.; Brower, M.; Zack, J.; Sá, A. L., 2001. Atlas do potencial eólico brasileiro. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESESB) e Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), Rio de Janeiro, RJ.
- ANEEL, 2006. Atlas de energia elétrica do Brasil. Parte II, Fontes Renováveis, cap. 4. Agência Nacional de Energia Elétrica.
- ANP, 2016. Gás natural. In: <http://www.anp.gov.br/wwwanp/gas-natural>. Acessado em 19/11/2016.
- BEN, 2015. Balanço Energético Nacional 2015 ano base 2014. Empresa de Pesquisa Energética, EPE, Rio de Janeiro.
- BIOENERGIA, 2016. Energia fotovoltaica. In: <http://www.bioenergiaengenharia.com.br/Sustentabilidade.aspx>. Acessado em 16/11/2016.
- EIA, 2016. International Energy Statistics. In: <http://www.eia.gov/beta/international/data/browser/>. Acessado em 02/12/2016.
- ELETOBRAS, 2016. Potencial hidrelétrico brasileiro por bacia – dezembro 2015. In: <https://www.eletronuclear.com/elb/data/Pages/LUMIS21D128D3PTBRIE.htm>. Acessado em 03/12/2016.
- ELETRONUCLEAR, 2016. Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto. In: <http://www.eletronuclear.gov.br/Saibamais/Tecnologia.aspx>. Acessado em 02/12/2016.
- EPE, 2014. Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos. Nota Técnica DEA 19/14. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Rio de Janeiro, Outubro de 2014.
- Faria, F. A. M.; Jaramillo, P.; Sawakuchi, H. O.; Richey, J. E.; Barros, N. 2015. Estimating greenhouse gas emissions from future Amazonian hydroelectric reservoirs. Environmental Research Letters, 10, 124019.
- Furtado, C., 2006. Formação econômica do Brasil, Pag. 31-41. Editora Companhia das Letras.
- GASNET, 2106. Mapas de gasodutos. In: <http://www.gasnet.com.br/gasodutos/operacao.asp>. Acessado em 19/11/2016.
- CGTEE, 2016. Complexo termelétrico de Candiota. In: <http://cgtee.gov.br/COMUNICACAO/IMAGENS/>. Acessado em 19/11/2016.
- Goldemberg, J; Lucon, O., 2008. Energia, meio ambiente e desenvolvimento. Ed. Edusp.
- Guedes, D.; Pinto Junior, O., 2016. Modelo de Previsão de Vazão do Rio Madeira Aplicado ao Planejamento de Operação da Usina Hidrelétrica de Santo Antônio – Rondônia. VII Simpósio Brasileiro de Geofísica, 25-27 de outubro de 2016, Ouro Preto, MG.

- Harari, Y., 2015. Sapiens, uma breve história da humanidade. Pag. 1-100. Editora L&PM, 1ª edição.
- INB, 2016. Indústrias Nucleares do Brasil. In: <http://www.inb.gov.br/pt-br/WebForms/default.aspx>. Acessado em 02/12/2016.
- ITAIPU, 2016. Unidades geradoras. In: <https://www.itaipu.gov.br/energia/unidades-geradoras>. Acessado em 16/11/2016.
- Marr, A., 2012. Uma história do mundo. Pag. 375-393. Ed. Intrínseca.
- Moreira, J. M. L. et al., 2006. Situação atual dos rejeitos radioativos no Brasil e no Mundo. Associação Brasileira de Energia Nuclear (ABEN). In: <https://sites.google.com/site/joaomoreirauabc/home/publicacoes>. Acessado em 02/12/2016.
- NEOSOLAR, 2016. Painel solar fotovoltaico. In: <http://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/painel-solar-fotovoltaico>. Acessado em 16/11/2016.
- PETROBRAS, 2016a. Plataformas. In: <http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/nove-plataformas-que-vao-ampliar-a-producao-de-petroleo-no-brasil.htm>. Acessado em 19/11/2016.
- PETROBRAS, 2016b. Refinarias. In: <http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/refinarias/>. Acessado em 19/11/2016.
- SOLARESOL, 2016. Solar e sol – aquecedor solar. In: <http://www.solaresol.com.br/loja/>. Acessado em 16/11/2016.
- SOLETROL, 2016. Aquecedor solar Soletrol. In: <http://www.soletrol.com.br/>. Acessado em 16/11/2016.
- STATISTA, 2106. In: <https://www.statista.com/statistics/274168/biofuel-production-in-leading-countries-in-oil-equivalent/>. Acessado em 16/11/2016.
- Twidell, J.; Weir, T., 2006. Renewable Energy Resources. Pag. 85, 146, 182, 263 e 351. Ed. Taylor and Francis.
- UFPE, 2000. Atlas solarimétrico do Brasil. Universidade Federal de Pernambuco. Ed. Universitária da UFPE.