

O futuro da energia brasileira: fissão, fusão nuclear e o reaproveitamento energético do lixo

Lucas C. de Araujo, Luís Santos

Resumo: Neste trabalho, mostramos a origem da energia nuclear e explicamos de forma simplificada os processos da fissão e fusão nuclear, junto aos avanços nacionais e internacionais nestas áreas. Abordamos também as maneiras de, a partir do lixo que produzimos, obtermos energia, através de modelos como: incineração, pirólise, gaseificação e tratamento com plasma. Ao final, é apresentada a situação nacional da distribuição das matrizes energéticas, os possíveis problemas futuros e propostas para a solução destes.

Palavras-Chave: Energia nuclear, Fissão, Fusão, Lixo, Reaproveitamento energético.

Abstract: In this job, we show the source of nuclear energy and explained in a simplified manner the processes of nuclear fission and fusion, with national and international developments in these areas. We also analyzed ways, from the waste we produce, obtain energy by models such as incineration, pyrolysis, gasification and plasma treatment. At the end, it is presented the national situation of the distribution of the energy matrix, possible future problems and proposals for solving these.

Key-Words: Nuclear energy, Fission, Fusion, Garbage, Energy reuse.

1- Introdução:

A humanidade, a partir da revolução industrial, passou a ser dependente da energia elétrica. Quanto mais o tempo passa, a quantidade de energia gasta por países, principalmente os desenvolvidos e em desenvolvimento aumenta. As fontes de energia que são usadas atualmente não são totalmente eficazes. Muitas delas poluem o meio ambiente liberando gases na atmosfera como dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4) e não atendem a alta demanda de energia, o que ocasiona a necessidade de um número maior de usinas para fornecer o exigido.

O consumo de energia possui uma forte relação com o IDH (índice de desenvolvimento humano). O IDH foi criado pela ONU em 1990 como uma medida que avalia a qualidade de vida e o desenvolvimento econômico, na qual o nível de educação, saúde e renda são os principais fatores a serem avaliados em uma população. Ele varia de 0 a 1, os países mais próximos de 1 são os mais evoluídos. Essa relação mostra que, quanto mais o país é desenvolvido, mais energia ele consome [1].

O surgimento de novas tecnologias e o aumento da população mundial são alertas para essa questão da energia no futuro, pois o principal meio de obtenção de energia hoje ainda é a queima de combustíveis fósseis. Ela não é renovável, pois as fontes são limitadas por serem de origem orgânica levando milhões de anos para se formar e prejudica o meio ambiente, isso mostra o quanto precisamos de uma energia limpa e de longo prazo.

Outro problema que a população mundial enfrenta e que se não for resolvido logo, alastrar-se-á no futuro é o lixo. Uma pessoa produz, aproximadamente, 1,4 kg de lixo por dia no Brasil [2] e a expectativa é de que esse número cresça ao longo dos anos. Existem diversas formas de se tratar o lixo e recentemente estão sendo desenvolvidas maneiras de obter energia a partir dele em processos como incineração, pirólise, gaseificação e plasma [3].

No século passado, o mundo descobriu o poder da divisão do átomo, em 2 de agosto de 1939, o professor Albert Einstein escreve uma carta a Roosevelt, presidente dos EUA, pedindo providência e apoio para combater os alemães pois eles acreditavam que os alemães pudessem fabricar uma arma de grande poder de destruição e ao assinar a carta, ele escreveu “*Pela primeira vez na história o homem usará uma energia que não aquela proveniente do sol.*”[4]. O processo da fissão nuclear é capaz de gerar muita energia e vem sendo “domesticado” nas

usinas a fim de transformar essa energia liberada em energia elétrica. Depois de separar o átomo, o processo se inverteu, agora a tentativa é de unir dois átomos a fim de formar um único apenas. Nas últimas décadas, pesquisadores vem estudando e desenvolvendo máquinas que tentam realizar o mesmo processo que ocorre no interior das estrelas a milhões de graus centígrados e a enormes pressões aqui na Terra. A fusão nuclear é a esperança de energia para o futuro, pois é uma fonte limpa, ela não deixa resíduos radioativos nem emite gases poluentes na natureza preservando assim o meio ambiente, e renovável com um combustível abundante e encontrado em todo o globo terrestre [5]. Para compreender melhor como funcionam esses processos nucleares e de reaproveitamento do lixo, deve-se entender alguns conceitos que serão apresentados a seguir.

2- Energia de Ligação por Núcleon

Nos processos nucleares, a energia de ligação é a energia que deve ser fornecida ao núcleo para separar seus prótons e nêutrons, unidos, até uma distância infinita, estando na escala de Megaelétron-Volt (MeV). A quantidade de energia de um objeto em repouso é intimamente relacionada com a massa e entendida pela relação $E = mc^2$. Assim podemos dizer que se conseguirmos “estilhaçar” um átomo separando os prótons dos nêutrons, a energia liberada será igual a diferença de energia das massas dos prótons mais nêutrons que foram liberados pela energia inicial do átomo antes do processo de ruptura, em linguagem matemática teremos:

$$E_{\text{Ligação}} = [Zm_{\text{Próton}} + (A-Z)m_{\text{Nêutron}} - m(Z,A)]c^2$$

E – Energia Z – Número de prótons A – Número de massa
m – Massa C – Velocidade da luz

A figura a seguir mostra o gráfico de energia de ligação por nucleon em função do número de massa.*

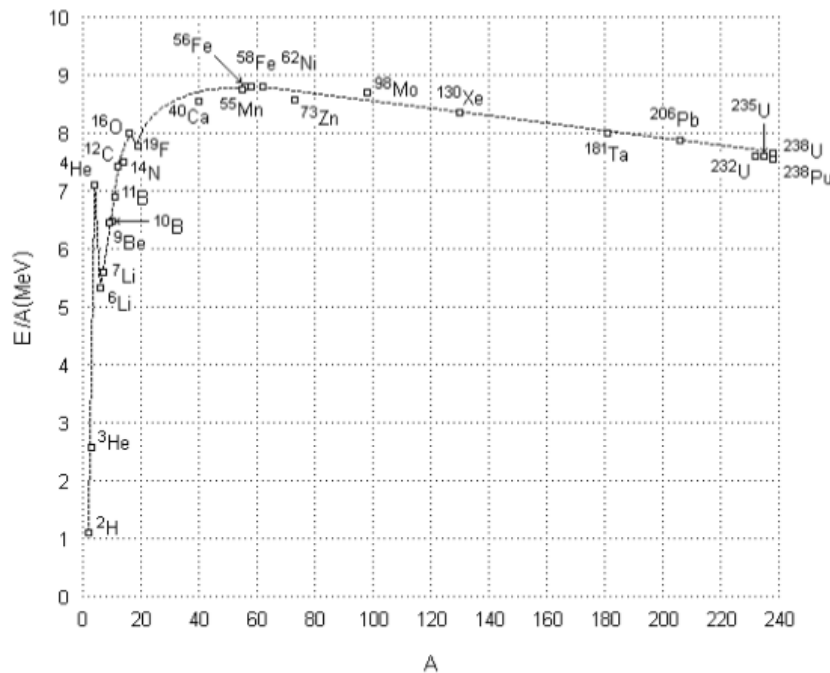


Fig. 1: Gráfico da energia de ligação por nucleon [6].

O núcleo que possui a menor energia de ligação é o ^2H (Deutério, isótopo do Hidrogênio) e o núcleo mais pesado é de ^{56}Fe . A interação forte é a força que mantém os núcleons unidos superando a repulsão coulombiana, até hoje sabe-se que ela é a força mais forte da natureza e é descrita pela cromodinâmica quântica, mas possui um pequeno raio de atuação (10^{-15} m) que pode ser estimado da seguinte forma:

$$R = r_0 \cdot A^{1/3}$$

R é o valor médio do raio, r_0 é o coeficiente empírico que pode ser considerado o mesmo para todos os átomos, para a distribuição de carga r_0 vale $1,2 \cdot 10^{-15}$ m e para uma distribuição de massa vale $1,4 \cdot 10^{-15}$ m e A é o número atômico.

Logo, sabe-se que a energia liberada nos processos de fissão e fusão provém da variação da energia de ligação [6].

*os elementos da parte superior da curva são os elementos mais estáveis, os da parte inferior são os mais apropriados para o processo de fusão nuclear e os da ponta direita são os mais apropriados para o processo de fissão nuclear.

3- Radiação

A radiação sempre é citada quando se fala em processos nucleares, principalmente quando a questão é a segurança.

Ela é a propagação da energia e pode ser encontrada de várias formas. As principais a serem faladas no tema são: as partículas alfa que são partículas compostas por 2 prótons e 2 nêutrons (núcleos de Hélio), as partículas beta que são elétrons de alta energia ou pósitrons, os raios x que são uma forma de radiação eletromagnética, de caráter semelhante à luz visível e, por último, raios gama, geralmente produzidos por elementos radioativos, são também uma forma de radiação eletromagnética que emitem calor continuamente por serem um tipo de radiação muito energética (MeV) e penetram profundamente na matéria [6].

Nem toda radiação é nociva e a prova disso é a luz visível, que é formada por vários comprimentos de onda. Ela é uma forma de radiação eletromagnética que não nos causa dano porque possui uma energia baixa, isso se o tempo de exposição não for muito grande. Além disso, o nosso organismo se defende da radiação através da melanina, ela é responsável pela coloração da pele e tem a função de proteger o DNA contra a radiação do sol. Ela deixa a pele com uma camada mais espessa que nos protege dos raios ultravioletas. Uma exposição ao sol por um longo período ou ao longo dos anos sem proteção, pode causar câncer de pele. Os albinos, pessoas que quase ou não possuem melanina, são mais propensas a sofrer queimaduras por radiação solar e desenvolver câncer de pele.

Ao afetar os átomos de um organismo vivo, ela pode gerar uma reação em cadeia pois afeta moléculas, depois células, tecidos, órgãos, até afetar todo o organismo. Isso altera as características físico-químicas das células podendo gerar alterações no DNA. Os efeitos podem ser crônicos, quando se manifestam ao longo do tempo, ou agudos, que são imediatos. Mutações no DNA ocorrem quando há mudança na sequência de nucleotídeos no material genético e podem ser hereditárias pois quando as células se duplicam para a geração de gametas para a reprodução, o material genético que sofreu mutação é passado a diante [7].

As radiações que não nos causam mal provenientes dos átomos instáveis são chamadas de radiação não-ionizante, esta atravessa a matéria, mas não tem o poder de destruir as ligações

moleculares [8]. Enquanto isso a radiação ionizante que nos causa mal afeta a composição da matéria. Mesmo que nem todas nos causem mal, deve-se ter um rígido processo de segurança quando se for trabalhar com qualquer tipo [9].

Quando as bombas nucleares foram lançadas em Hiroshima e Nagasaki, selando o fim da Segunda Guerra Mundial, além de matar muitas pessoas, não se pode viver perto da região por muito tempo onde aconteceu a explosão devido a radiação. Hoje os solos não estão mais contaminados, então qualquer alimento plantado ali pode ser consumido sem problemas. Os efeitos genéticos causados nos sobreviventes são perceptíveis até hoje, pois crianças ainda nascem com problemas genéticos [10].

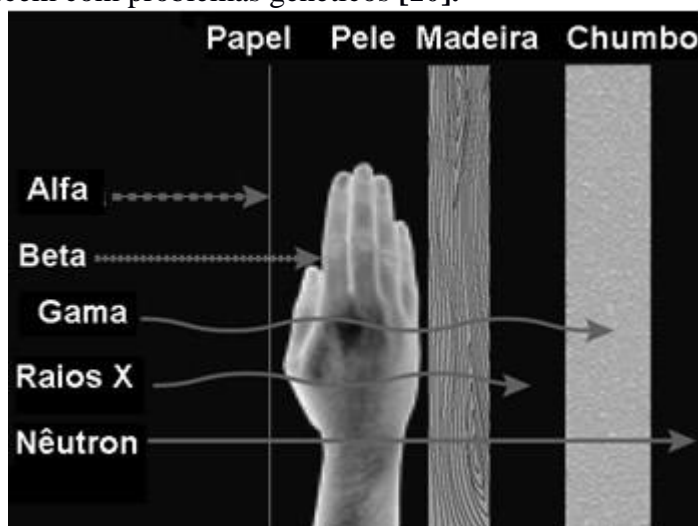
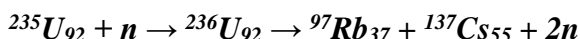


Fig. 2: Formas de penetração na matéria de cada tipo de radiação. [11]

4- Fissão Nuclear

Os processos de fissão nuclear consistem na divisão de um núcleo que se divide em dois ou mais fragmentos. Geralmente, a fissão ocorre com elementos de núcleos pesados ($A \geq 92$) espontaneamente, ou ela pode ser induzida artificialmente, quando um núcleo é bombardeado por nêutrons, por exemplo. A razão do uso de elementos pesados é devido a sua instabilidade por haver muitos nêutrons em seu núcleo, pois também existem elementos de número atômico menor que 92 que também estão sujeitos a fissão [6].



Neste exemplo, um núcleo de Urânio-235 captura um nêutron, mesmo que este possua uma energia cinética baixa (0,025eV), formando um núcleo de Urânio-236. Este por sua vez, fissiona e gera um núcleo de Rubídio-97, Césio-137 e dois nêutrons. Com base no gráfico E/A por A, o núcleo de Urânio-236 possui uma energia de ligação de 7,7MeV, o de Rubídio-97 tem 8,6 MeV e o de Césio-137 possui 8,2 MeV. A energia liberada será a variação da energia de ligação, logo:

$$\Delta E = E(\text{Rb} + \text{Cs} + 2n) - E(\text{U})$$

$$\Delta E = 97(8,6\text{MeV}) + 137(8,2\text{MeV}) + 2(7,7\text{MeV}) - 236(7,7\text{MeV})$$

$$\Delta E = 155,8\text{MeV}$$

Os nêutrons que são liberados do núcleo vão encontrar novos núcleos, gerando, portanto, reações em cadeia. A fissão de um átomo de urânio libera grande quantidade de energia, se for descontrolada, a reação será explosiva, esse é o princípio da bomba atômica. Ela possui um potencial tão devastadora porque assim que as reações começam, a radiação é liberada, sendo fatal para a área afetada.

Este cálculo é uma aproximação do real, pois como os elementos que resultaram são instáveis, eles ainda decaem, emitindo partículas beta, raios gama e neutrinos. A energia liberada desta reação é da escala de 200 MeV. Conclui-se então que para a fissão ocorrer, é necessário que a soma das energias de ligação dos produtos seja maior que a energia de ligação do “núcleo mãe”. *

Uma usina nuclear convencional que usa a fissão para gerar energia funciona da seguinte maneira:

- 1- O combustível é posto dentro do reator para que as reações de fissão comecem, produzindo então energia térmica.
- 2- A água do mar é posta em torno do reator para resfriá-lo, aquecendo-se e evaporando.
- 3- O vapor é direcionado a turbinas de geradores elétricos que ao passarem por elas, vão para um condensador para retornarem ao estado líquido. As turbinas giram os rotores dos geradores produzindo energia elétrica, que será distribuída pelas linhas de transmissão.
- 4- A água volta para o mar e o processo se repete.

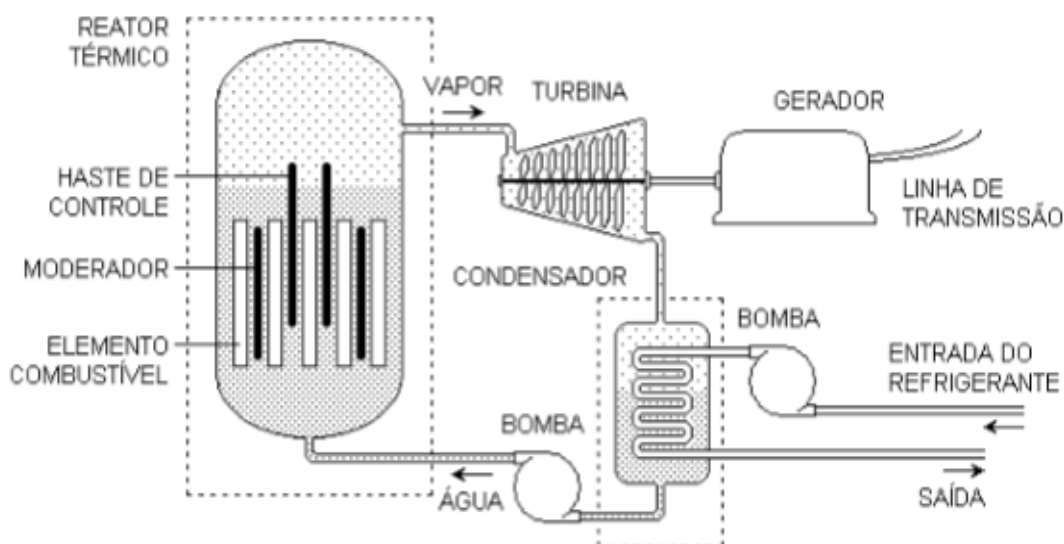


Fig. 3: Esquema de um reator de fissão nuclear [6]

O combustível de urânio é colocado em grandes tubos de zircônio, para formarem barras do tamanho do reator. Usa-se o zircônio por causa de sua resistência a ação corrosiva da água quente. Deste modo, pode-se garantir que a água que voltará ao mar não estará contaminada [12].

Pesquisadores monitoram constantemente o meio ambiente ao redor das usinas para ver se há algum impacto causado. Geralmente, antes da construção, são coletados amostra da água do mar, da chuva e da superfície, de areia da praia, algas, peixes, leite, pasto e do ar. O nível da radioatividade natural daquela região é medida e os dados serão usados para comparar com as futuras amostras da região [13].

*A fissão nuclear espontânea ocorre da mesma maneira que a fissão induzida, a diferença é que ela não será autossustentada pois não gerará nêutrons para continuar as fissões dos outros átomos.

5- Plasma

O plasma é conhecido como o 4º estado da matéria. Ele ocorre quando um gás é aquecido até que os elétrons sejam rompidos dos átomos, deixando partículas eletricamente carregadas. Pelo plasma ser um portador de carga, responderá a campos eletromagnéticos. Ele é considerado um estado diferente da matéria pois possui propriedades diferentes do sólido, líquido e gasoso [14].

O plasma “ideal” com partículas completamente dissociadas, teria uma temperatura de dezenas de milhões de graus. O aquecimento do gás pode ser feito por um campo elétrico externo aplicado ao gás. Cerca de 99% da matéria do universo se encontra na forma de plasma.

Na indústria ele é utilizado para tratamentos de superfícies, corte e soldagem de metais, lâmpadas fluorescentes, gravação em microeletrônica etc. Existem diversos tipos de plasma de temperaturas e densidades diferentes como mostra o gráfico a seguir:

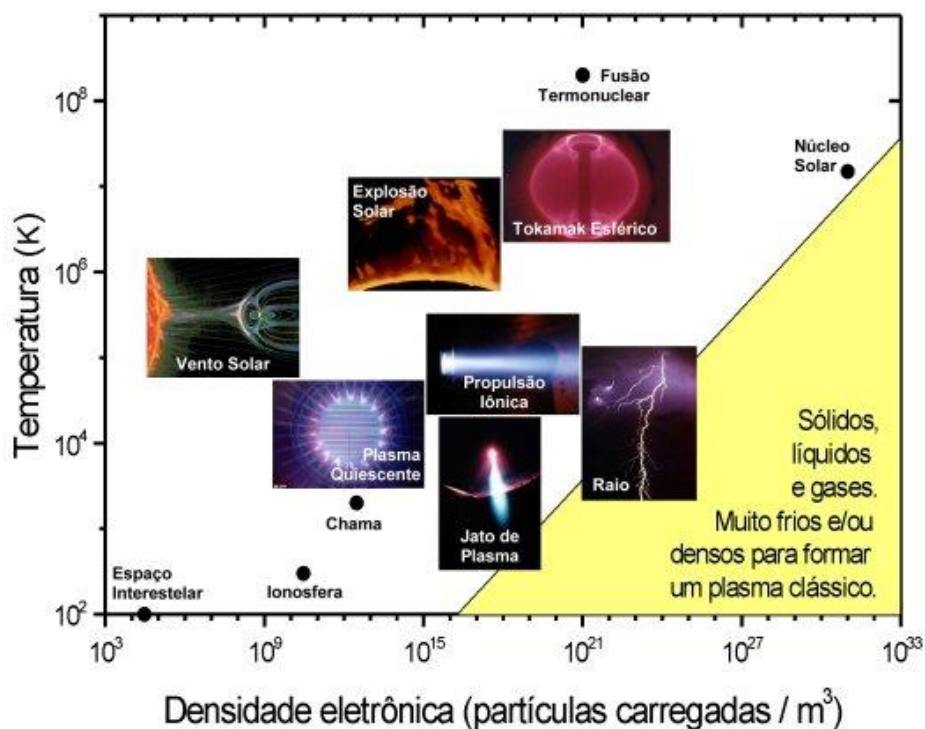


Fig. 4: Gráfico da densidade do plasma pela temperatura [15].

Para a fusão termonuclear, o plasma é importante pois está em temperaturas altíssimas e por responder a campos eletromagnéticos pode ser controlado. Com isso a agitação térmica das moléculas ou átomos pode superar a força que mantém unidos os próton, os nêutrons e os elétrons ao núcleo [15].

6- Fusão Nuclear

A fusão nuclear consiste na união de dois átomos que formarão um terceiro de maior número atômico. Este processo necessita de uma energia alta para ocorrer pois é preciso ultrapassar a barreira coulombiana até o ponto em que a força nuclear forte tenha um papel mais importante

(a força forte é a força da interação entre os quarks e glúons). A energia liberada é muito maior que a energia que foi necessária para iniciar a reação, da escala de MeV [6].

A fusão só pode ocorrer com átomos de $A < 56$ como mostra o gráfico de energia de ligação por núcleon. Não há maneiras conhecidas, até hoje, de alguma reação deste tipo acontecer pois a energia necessária a ser fornecida para que o processo ocorra é maior do que a energia que seria libertada por ele, fazendo o saldo ser negativo, o que seria impossível.

Tudo o que conhecemos hoje é fruto da fusão nuclear, as pessoas, nosso planeta, nosso sol etc. Ela não é completamente dominada, começou a ser pesquisada nas últimas décadas e ainda continuará sendo. A União Europeia junto a outros países, estão desenvolvendo o maior reator de fusão do mundo, o ITER, que possui o objetivo de mostrar a viabilidade da obtenção de energia através da fusão nuclear. Existem três principais maneiras dela ocorrer, por confinamento gravitacional, por confinamento inercial e por confinamento magnético. Ainda existe outra maneira de realizar a fusão, porém não é bem aceita pela ciência e muito questionada, a fusão a frio [5].

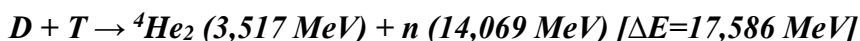
Para que o processo seja iniciado, é necessário fornecer energia aos átomos, para que adquiram uma energia cinética que seja suficiente para romper a barreira de Coulomb e ao se chocarem se fundirem. A temperatura do combustível da fusão chega a milhões de graus centígrados o que o faz estar na forma de plasma.

Pode-se estimar com razoável precisão a temperatura da reação a partir da energia cinética da molécula por intermédio do teorema da equipartição de energia

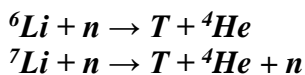
$$E_c = m \cdot \langle v^2 \rangle / 2 = 3/2 \cdot K_B \cdot T$$

E_c - Energia cinética $\langle v^2 \rangle$ - Velocidade média das moléculas ao quadrado
 m - Massa K_B - Constante de Boltzmann T - Temperatura

O processo mais comum realizado aqui na Terra usa o Deutério e o Trítio (isótopos do Hidrogênio, $^2\text{H}_1$ e $^3\text{H}_1$ respectivamente) para a fusão e é realizado da seguinte maneira:

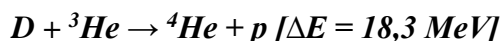


Um dos problemas para essa reação é o Trítio. Ele possui uma meia vida de 12,3 anos e decai para ^3He , emitindo partículas β . Ele também é raro aqui na Terra, a fonte de Trítio mais próxima do nosso planeta é a lua. Não é um processo viável trazê-lo de lá, então, ele é produzido artificialmente a partir da fissão do ^6Li ou ^7Li através das reações:



O Deutério já é um pouco mais abundante, ele é encontrado nas águas do oceano na proporção de 1: 6700 átomos (30g/m³) [16].

A seguinte reação é mais eficiente para os processos fusão nuclear. Esta não é possível de ser realizada, pois, é necessário ^3He que não existe no nosso planeta e ainda não se conhece processos para que se possa obtê-lo artificialmente [6].



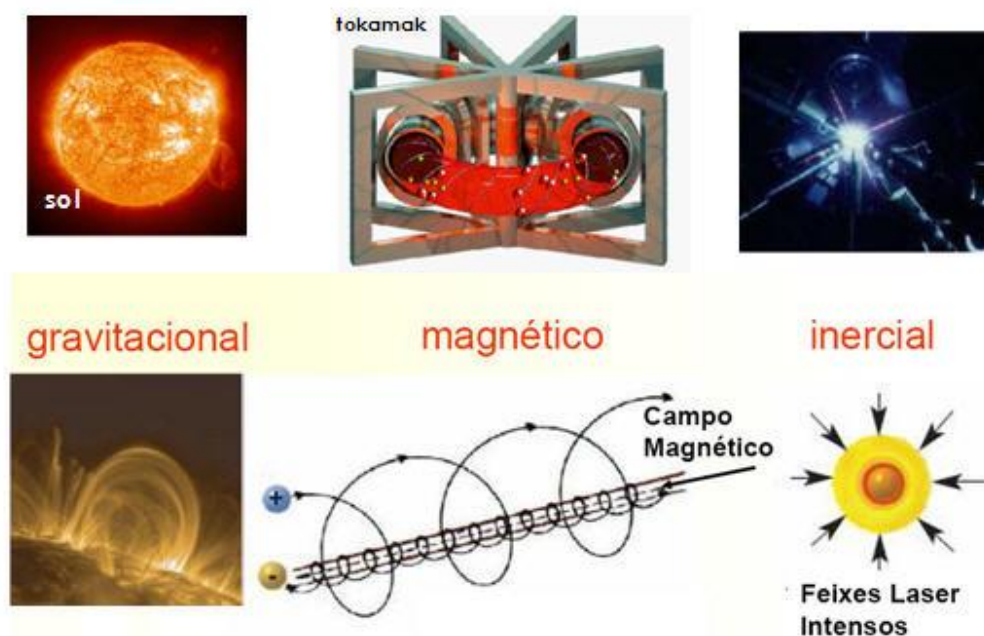


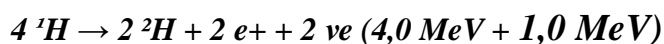
Fig. 5: Formas de fusão nuclear [17].

6.1- O Sol e o Confinamento Gravitacional

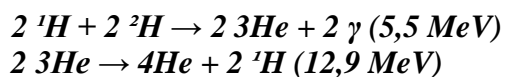
O sol é a estrela central do nosso sistema solar, a qual nós e todos os planetas a orbitam. Ele brilha há cerca de 4,5 bilhões de anos e ainda brilhará por mais 10 bilhões de anos [18]. Ele é composto por 73,46% de Hidrogênio, 24,85% de Hélio, 0,77% de Oxigênio, 0,29% de Carbono, 0,16% Ferro e 0,47% de outros elementos e ele corresponde a 99,86% da massa do sistema solar [19].

A pressão e a temperatura dentro do núcleo do sol e das outras estrelas do universo são enormes (340 bilhões de vezes a pressão na Terra ao nível do mar e $1,5 \cdot 10^7$ °C), o que faz com que a matéria se encontre no estado de plasma. Lá, o hidrogênio é transformado em hélio através da fusão nuclear. Esse processo pode ocorrer de duas maneiras, pelo ciclo CNO (carbono-nitrogênio-oxigênio) ou pela cadeia próton-próton.

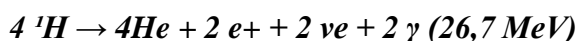
Na cadeia próton-próton, quatro núcleos de hidrogênio se fundem e ocorre decaimento β^+ (em um decaimento β^+ , um próton dá lugar a um nêutron, emitindo um pósitron e um neutrino de elétron, em um decaimento β^- , um nêutron dá lugar a um próton, emitindo um elétron e um anti-neutrino de elétron) com dois desses átomos, tendo resultado final dois núcleos de deutério (isótopo do hidrogênio, $^2\text{H}_1$).



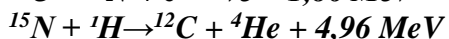
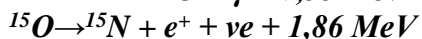
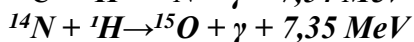
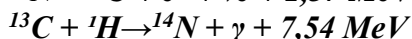
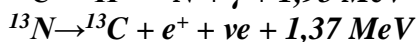
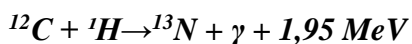
Em seguida, mais dois núcleos de hidrogênio se fundem cada um com um átomo de deutério cada, formando dois núcleos de $^3\text{He}_2$ (isótopo do hélio) e liberando radiação gama. Em seguida, esses núcleos de $^3\text{He}_2$ se fundem formando um núcleo de hélio e dois de hidrogênio.



A equação simplificada ficaria da seguinte maneira:



No ciclo CNO, quatro núcleos de hidrogênio vão se fundindo a isótopos de carbono, nitrogênio e oxigênio, ao longo de reações onde ocorrem decaimentos β^+ .



Ao final desse ciclo, o carbono que foi utilizado para começar a reação é gerado novamente, junto ao núcleo de hélio que é produzido mais a liberação de energia [6].

6.2- Lasers e o Confinamento Inercial

Um feixe de laser é formado por 192 raios ultravioletas menores que percorrem 1,5 km através de placas do chamado “vidro laser”, o qual consiste no vidro fosfato combinado com um aditivo químico de átomos de neodímio. Esse vidro é o responsável pela amplificação dos raios emitidos para que eles alcancem a energia necessária para a realização dos experimentos [20].

No reator de confinamento inercial, existe em seu centro a câmara alvo, onde encontra-se um cilindro de poucos centímetros chamado *hohlraum* e dentro dele é colocado uma cápsula que contém o combustível de Deutério e Trítio, essa cápsula é quase do tamanho de um grão de açúcar, possuindo 2mm de diâmetro.

Os 192 feixes são focados no cilindro e ao atingirem a parede interior que é feita de ouro, a aquece e cria feixes de raios x que a tingem a cobertura de plástico da cápsula, dilatando-a e comprimindo o Deutério e o Trítio. Mais de 500 trilhões de Watts estão sendo focados na cápsula e ela fica sobre a pressão de 100 bilhões de atm. Quando a densidade do combustível chega a 10 vezes a densidade do chumbo e a 30 milhões de graus centígrados, a fusão é iniciada e a energia é liberada, o processo ocorre em nanossegundos [21]. A primeira obtenção de energia pelo confinamento inercial ocorreu em 2013, quando os feixes (2 MJ) liberaram uma energia de 16 kJ.* [22].

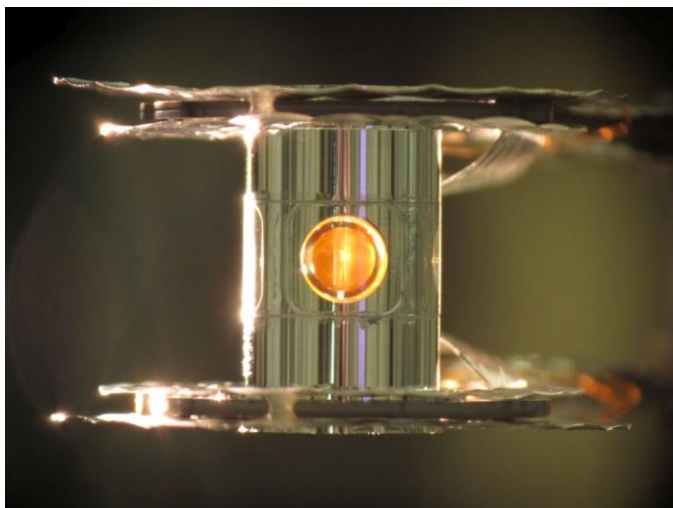


Fig. 6: Hohlraum [23].

*Esses dados são referentes ao National Ignition Facility (NIC) nos Estados Unidos

6.3- Os Tokamaks e o Confinamento Magnético

O reator de confinamento magnético é, geralmente, conhecido como tokamak. Foi criado pelos soviéticos em 1960 e a palavra é um acrônimo das palavras em Russo: toroidalnaya kamera magnitnaya katushka (câmara toroidal com bobina magnética).

Dentro deles, existe a câmara de vácuo onde o combustível é lançado. Ele é aquecido a, aproximadamente, 100 milhões de graus centígrados e se torna um plasma. As paredes do reator não suportariam uma temperatura dessa sem serem danificadas, então, o plasma é confinado magneticamente através de campos formados por bobinas do lado de fora. O campo magnético dentro de um tokamak típico varia de 1 a 7 tesla [16].

Quando o combustível atingir a temperatura necessária, o Deutério e o Trítio começarão a se fundir formando Hélio e nêutrons e liberando energia. O problema do Trítio neste caso é resolvido dentro do reator, pois existe um módulo de camada fértil dentro da câmara de vácuo onde se encontra o Lítio. Os nêutrons liberados vão de encontro ao Li, fissiona-o e gera mais T. A energia liberada e a energia dos nêutrons são absorvidas pelo módulo e usadas para aquecer uma caldeira que fará o vapor girar uma turbina e gerando energia elétrica. O He e outras impurezas que estiverem dentro do reator são removidos por um divisor [5].

A vantagem da maior parte do Trítio ser produzido dentro do reator é que não necessita de transporte, diminuindo mais as chances de se espalhar radiação. Outra vantagem do tokamak é que caso haja um problema, a reação para em poucos segundos porque o plasma para de receber energia e não pode ser sustentado, voltando a virar gás. Quando o plasma chega ao ponto em que as reações de fusão já o autossustentam, ou seja, quando não é necessário fornecimento de mais energia do meio externo, o reator também se autossustenta, fornecendo energia para si mesmo [24].

Devido ao decaimento do trítio, para a segurança dos trabalhadores, as centrais de potências de fusão são projetadas de forma que não haja risco no manuseamento do trítio [5]. O reator também é isolado por uma parede de quase dois metros de espessura de aço para que caso haja um vazamento da energia ela não escape mais, causando problemas a região em torno do reator.

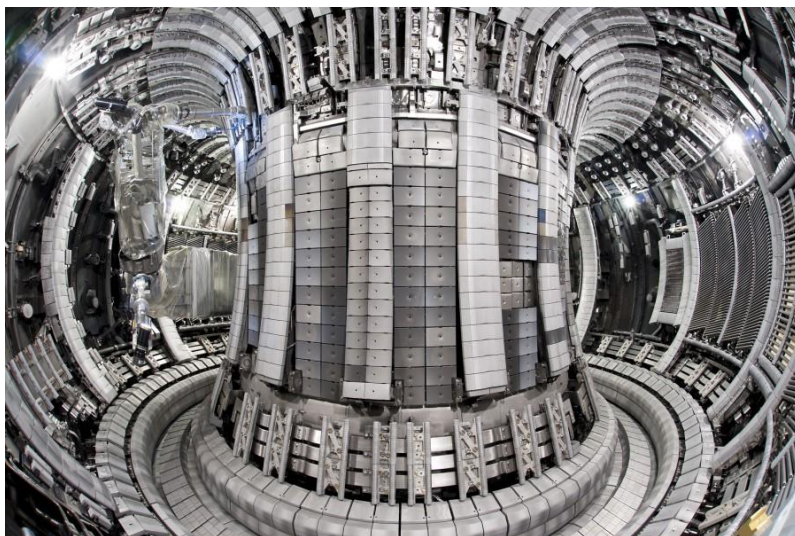


Fig. 7: Interior de um Tokamak [25].

6.4- Fusão a Frio

A fusão a frio é uma reação de fusão nuclear que ocorre em condições de temperatura ambiente, ao invés de milhões de graus requeridos pelo plasma. Em 1989, os cientistas Fleischmann e Pons anunciaram ter conseguido realizar a fusão a frio.

Era notícia de primeira página e gerou uma controvérsia incrível, mas o debate público diminuído rapidamente e a fusão a frio foram rejeitados pela comunidade científica. Cientistas de várias partes do mundo tentaram reproduzir os resultados, houveram várias tentativas, mas todas sem sucesso.

A realidade de Pons e Fleischmann se constituiu em um passo significativo num longo processo de desenvolvimento científico e tecnológico, uma vez que, devidamente sedimentada, a fusão a frio será um valioso processo de energia [26].

Em 2011, o engenheiro Andrea Rossi, da Universidade de Bolonha, Itália, criou um dispositivo que realiza reações nucleares de baixa energia, com gás hidrogênio e níquel em pó, chamado de E-Cat [27]. Este foi um grande avanço nessa área e o E-Cat é uma tecnologia em desenvolvimento, mas pode introduzir grandes mudanças geopolíticas e geoeconômicas no cenário mundial [28].

6.5- Reator de Fusão Híbrido

O reator híbrido de fusão–fissão surgiu na década de 90. A ideia era usar os nêutrons produzidos nas reações de fusão para continuar a queima do combustível de um reator de fissão. Isso permite aproveitar melhor as quantidades de urânio e plutônio no combustível nuclear, além de reduzir a quantidade de rejeito radioativo gerado.

A tecnologia desses reatores pode ter três propósitos: reduzir os rejeitos altamente radioativos induzindo reações de fissão ou transmutação, pode ser usado como gerador de elementos físséis a partir de elementos fissionáveis e como um sistema para o reaproveitamento do combustível queimado para a geração de energia elétrica. EUA, China e Turquia desenvolveram modelos para demonstrar a viabilidade dos reatores híbridos [29].

7- Reatores Nucleares

7.1- Reatores de Fissão Nuclear no Brasil

Atualmente, existem duas usinas de fissão nuclear no Brasil e mais uma em construção. Elas estão localizadas em Angra dos Reis, no estado do Rio de Janeiro.

A usina de Angra 1 entrou em funcionamento em 1985, ela possui uma potência de 640 megawatts e gera energia suficiente para suprir uma cidade de 1 milhão de habitantes, a cidade de Porto Alegre, por exemplo [30]. A usina nuclear brasileira Angra 2 opera com uma potência de 1.350 megawatts [31], ela é capaz de atender ao consumo de uma cidade de 2 milhões de habitantes, como por exemplo Belo Horizonte.

Juntas, as usinas contribuem muito para a matriz energética brasileira. Elas representam cerca de 3% da geração total de energia no país e são responsáveis por um terço da energia fornecida ao Estado do Rio de Janeiro [32].

Existe ainda uma terceira usina em construção, Angra 3 entrará em operação em 2018 com uma potência de 1.405 megawatts. Ela será capaz de gerar 12 milhões de megawatts-hora por ano e passará a gerar 50% da energia do estado do Rio de Janeiro. Foram investidos R\$14,9 bilhões e 3000 operários estão trabalhando na construção [33].

7.2- Reatores de Fusão Nuclear no Brasil

Existem três tokamaks no Brasil, um de pequeno porte, um de médio porte e um esférico. O de pequeno porte se encontram na Unicamp (Universidade Estadual de Campinas), o de médio porte na USP (Universidade de São Paulo) e o esférico se encontra no INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).

Na Unicamp, o estudo da fusão teve início em 1974 e as experiências em 1977 e hoje, o Nova (pequeno tokamak trazido do Japão) ajuda a equipe de lá a alcançar seus objetivos que são: desenvolvimento de diagnósticos e formação de alunos. Já o objetivo da USP é o estudo de aquecimento do plasma por ondas de Alfvén, que é feito no TCABR (tokamak de porte médio trazido da Suíça), seu antecessor era o TBR-1 (primeiro tokamak brasileiro) construído em 1977. No INPE, o ETE, construído em 1995, ajuda no estudo da física de plasma em tokamaks esféricos.

Outras instituições também estão envolvidas com atividades teóricas são UFGRS, UFMTS, ITA, UnB, UNESP e UFP [5].

7.3- Reatores de Fissão Nuclear para Colaborações Mundiais

Muitos países já adotaram as usinas de fissão nuclear para gerar energia e com isso, quase 15% da energia de todo o planeta é de origem nuclear. Os Estados Unidos é o líder do ranking possuindo 104 usinas em seu território, a França possui 58 usinas e é o país que a principal matriz energética é a nuclear, tendo 80% de sua energia gerada por estas usinas. Em seguida, está o Japão com 50, a Rússia com 33 e a Coreia do Sul com 21 usinas [34].

7.4-Reatores de Fusão Nuclear para Colaborações Mundiais

Pela fusão ainda estar em desenvolvimento no mundo, o número de reatores não chega perto em relação aos de fissão. Os maiores e principais são o NIF, o JET e o ITER.

O National Ignition Facility, NIF, é localizado na Califórnia, Estados Unidos, e custou 5,3 bilhões de dólares para ser construído e foi terminado em 2009. Ele é um reator de fusão por confinamento inercial [35].

O JET, abreviação de Joint European Torus, é o maior reator de fusão por confinamento magnético em operação. Ele foi construído em Culham, Inglaterra [16]. O projeto começou em

1973 tendo um custo de 13 bilhões de dólares e a primeira operação ocorreu em 1983. Em 1997, o JET gerou 16 MW e bateu o recorde mundial de geração de potência, mantendo esta marca até hoje [5].

A União Europeia, os Estados Unidos, o Japão, a China, a Rússia e a Índia, se uniram para a construção do maior reator de fusão por confinamento magnético, o ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). O projeto custou 5 bilhões de euros, e o local escolhido foi Cadarache, na França [16]. A primeira operação dele deverá ser em 2016 e será capaz de produzir 400 MW de potência [5].

8- Reaproveitamento Energético do Lixo

8.1- O Lixo no Brasil

O maior lixão do Brasil se encontra na capital Brasília, é também o maior da América Latina, está se transformando em uma cidade [36]. Esse e muitos outros junto aos aterros sanitários são os principais destinos do lixo no país. Ainda existem outros como a compostagem, coleta seletiva e reciclagem, incineração e tratamento especiais, mas somados não chegam nem perto a quantidade de lixo que possuem como destinos os aterros e lixões. Por ano, são produzidos mais de 63 milhões de toneladas de lixo [37], e são gasto mais de bilhões de reais para tratá-lo [38].

Além dos altos custos para o tratamento, os destinos dele ainda trazem problemas à saúde. Os lixões são focos de proliferação de doenças pois atraem ratos e baratas, eles também produzem chorume, pois os materiais orgânicos entra em putrefação e podem atingir rios, lagos e lençóis freáticos contaminando a água [39].

Saídas para o tratamento do lixo que ainda trazem benefícios são: a incineração, a pirólise, a gaseificação e o tratamento com plasma. Estes dão métodos de gerar energia a partir do lixo.

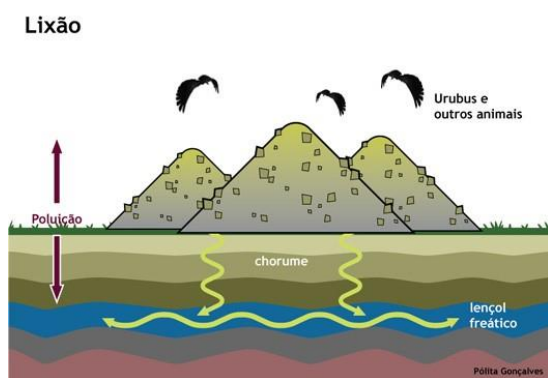


Fig. 8: Representação de um lixão [40].

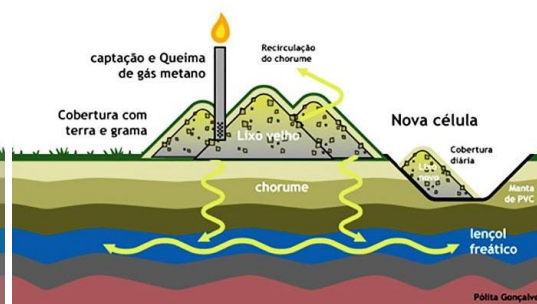


Fig. 9: Representação de um aterro [40].

8.2- Incineração

O processo da incineração consiste, na primeira fase, em pôr os resíduos sólidos dentro de um forno a alta temperatura (500-900°C) para que o lixo seja queimado, transformado em gás e para a diminuição de seu volume. Na segunda fase, os gases vão para uma segunda câmara para que haja a combustão completa com temperaturas variando de 750-1250°C. Em seguida, são

aspirados para uma caldeira de recuperação de calor onde será gerado vapor que irá acionar um conjunto turbo gerador, produzindo energia elétrica.

Os benefícios da incineração são a redução do volume para a disposição em aterros e a recuperação da energia durante a combustão pode ser usada para a produção de energia elétrica por meio da energia térmica [41].

8.3- Pirólise

A palavra pirólise possui origem grega e significa "decomposição pelo calor". A reação ocorre em altas temperatura em ambientes com pouco ou nenhum oxigênio. Nesse processo, a matéria orgânica é decomposta pela ação do calor originando dois ou mais produtos, como biocombustíveis [42].

O reator pirolítico pode tratar qualquer tipo lixo, desde o doméstico até resíduos industriais e plásticos que devem ser triturados depois de previamente selecionados [43]. Após a seleção e trituração, o material segue ao reator onde ocorrerá uma reação endotérmica e as consequentes separações dos subprodutos. O processo é auto-sustentável sob o ponto de vista energético, pois, a decomposição química pelo calor na ausência de oxigênio, produz mais energia do que consome.

8.4- Gaseificação

A gaseificação são as reações termoquímicas as quais um combustível sólido, na presença ar ou oxigênio e vapor d'água, forma gases que podem ser usados como fonte de energia térmica e elétrica, para síntese de produtos químicos e para a produção de combustíveis líquidos.

O principal produto da gaseificação apresenta-se como uma mistura de gases: monóxido de carbono, hidrogênio, dióxido de carbono, metano, traços de enxofre, outros hidrocarbonetos leves e impurezas. A composição final do gás proveniente da gaseificação dependerá, entre outros aspectos, das condições de operação como temperatura, pressão, tempo de residência, das características da matéria prima, do tipo de reator e das características dos agentes gaseificantes: ar ou oxigênio. Esse gás que é formado é chamado gás de síntese.

Após ele ser limpo, quando as impurezas e derivados do enxofre são retirados, ele alimenta uma turbina a gás gerando energia elétrica. O gás da combustão, enquanto está na caldeira de recuperação, alimenta uma turbina à vapor gerando mais energia elétrica [44].

8.5- Tratamento com Plasma

Similar ao processo da pirólise, o material é desagregado pelo calor à alta temperatura de uma tocha de plasma. O resultado são produtos sólidos e gasosos, preponderantemente compostos por hidrogênio e monóxido de carbono, que possuem um alto poder calorífico. Ao serem queimados, movimentam uma turbina, gerando energia elétrica que é usada também para alimentar a tocha.

A vantagem do uso do plasma é a menor produção de toxinas e cinzas. O dióxido de carbono e os outros produtos da combustão são tratados num sistema de limpeza e os resíduos sólidos podem ser usados na pavimentação de ruas. Não é a produção de metano, o gás de maior influência do aquecimento global [45].

9- Energia Brasileira

O Brasil é um dos poucos países no mundo em que a maior parte da energia produzida descende de fontes renováveis de energia. Pelo nosso país possuir muitos rios de planalto, optou-se por

adquirir o modelo das hidrelétricas. O problema dessa divisão das matrizes energéticas, pode gerar falta de energia em certas épocas do ano quando há falta de chuva. Isso ocorre porque os reservatórios não serão reabastecidos pelas águas pluviais.

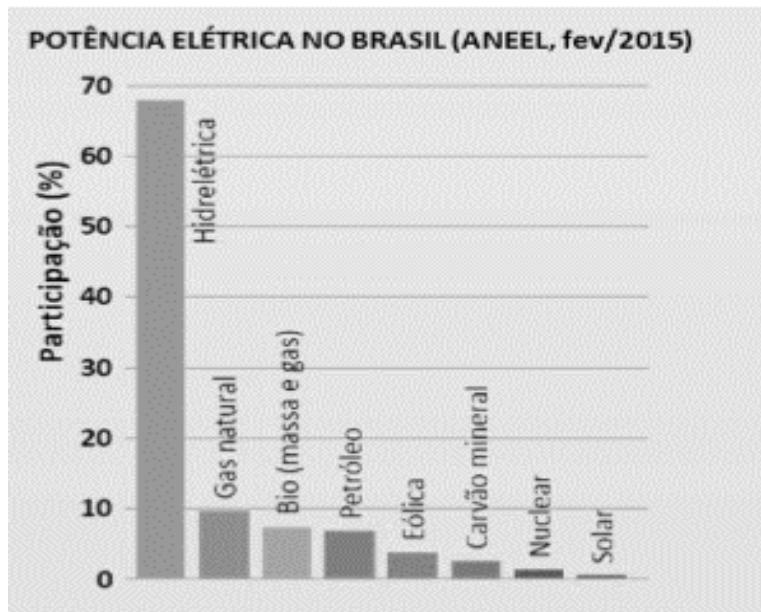


Fig. 10: Gráfico da Potência Elétrica no Brasil [4].

Não seria necessário um número alto de usinas hidrelétricas, (são 197 usinas hidrelétricas, 948 centrais geradoras hidrelétricas) [46] se houvesse maiores investimentos em outras formas de energia como a fissão nuclear, a fusão nuclear e o reaproveitamento do lixo.

A emissão de gases de efeito estufa é um outro problema pois a segunda maior fonte de energia do Brasil são os combustíveis fósseis. Esses são os que mais emitem gás carbônico.

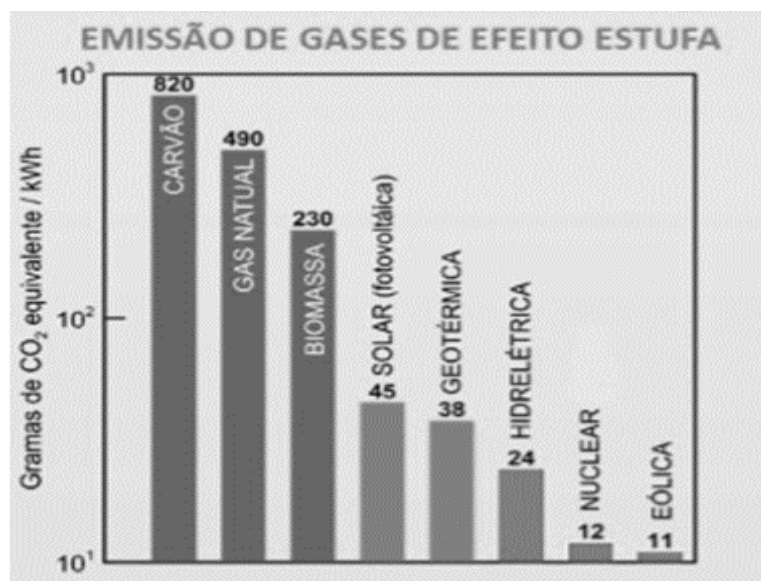


Fig. 11: Gráfico da geração de CO₂ por matriz energética [4].

A quantidade de combustível necessária para cada forma de energia possui uma diferença alarmante. Para uma gerar 1 GW por ano, uma usina de fusão necessita de 0,6 toneladas de deutério e lítio, uma usina de fissão necessita de 150 toneladas de urânio, uma usina que usa óleo como combustível, 10 milhões de barris de óleo e uma usina de carvão, 2,1 milhões de toneladas [16].

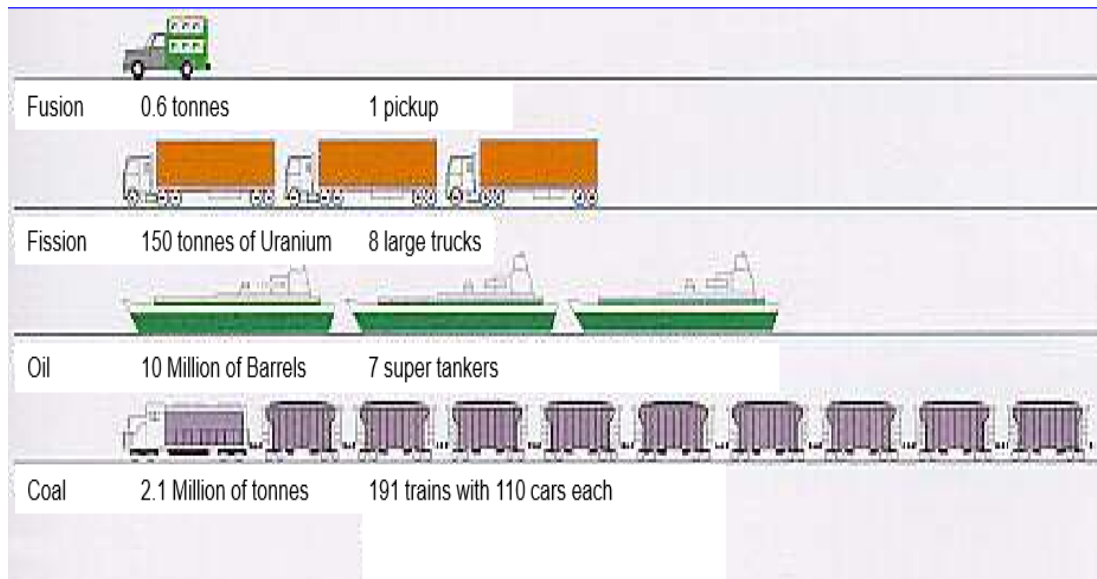


Fig. 12: Quantidade de combustível necessária para gerar 1 GW em 1 ano [16].

10- Conclusão

Os processos também apresentam algumas falhas que devem ser estudadas e pesquisadas para serem solucionadas:

- No caso da fissão, um dos maiores problemas é o uso desta para fins bélicos, como foi presenciado no fim da Segunda Guerra Mundial com um enorme poder de destruição. Ainda há a gestão dos resíduos radioativos que são produzidos e precisam de um local apropriado para ser depositado, corre-se um grande risco caso haja algum problema neste depósito, pois uma grande quantidade de radiação pode ser liberada causando um estrago devastador no meio ambiente. Ela também não é uma energia renovável pois os elementos químicos são extraídos de minerais, há também um risco de acidente nuclear por meio de falha humana, um exemplo é Chernobyl, e por acidentes naturais, como ocorreu em Fukushima. Já existem planos para alguns desses problemas, mas ainda não se encontram em prática [47].

- Uma das maiores desvantagens da fusão nuclear, atualmente, é o custo de produção da energia, pois ela não é completamente dominada, tornando necessário pesquisas para melhor eficiência dos reatores. A radiação também é um problema para ela devido ao uso do Trítio que possui uma meia vida de 12,3 anos, passando a emitir elétrons. Caso haja uma falha no reator e a energia das reações escape, pode ser que gere problemas para a área ao redor das instalações do reator pelas temperaturas serem superiores a 100 milhões de graus centígrados. Os nêutrons que durante as reações podem acabar sendo depositados nas paredes do reator causando a transmutação radiativa, ela é a alteração das propriedades químicas e físicas do material que compõe o reator. Todos esses problemas estão também sendo pesquisados para que no futuro as usinas de fusão sejam seguras [16].
- Os processos para obter energia a partir do lixo são pouco eficientes, apesar de reduzirem o volume de lixo gerado, a produção de energia é inferior em relação às outras matrizes energéticas. Outra desvantagem é que alguns resíduos sólidos não possuem grande poder calorífico.

Existem, atualmente, problemas de falta de energia em certos locais do Brasil, e com o crescimento da população, será necessária bastante energia para suprir a demanda em um futuro não muito distante. Para conseguirmos continuar sendo um país em desenvolvimento e acelerar este processo, precisa-se já pensar e realizar algo para que esse problema não cresça, e investir nessas áreas, ao meu ver, é a melhor solução que temos.

A adoção destas novas fontes de energia para o país trará benefícios econômicos, sustentáveis e sociais. Para a economia, o custo de produção de energia seria reduzido, no meio ambiente, a vida de algumas espécies animais não seriam afetadas pelo lixo humano e haveria uma diminuição da emissão de gases poluentes. No setor social, talvez até o mais importante, concederia à população mais empregos e uma melhor qualidade de vida uma vez que a energia uma vez que estes, estão relacionados, como mostra o IDH.

Busco por meio deste artigo, incentivar pessoas, assim como fui incentivado, a pesquisarem novas maneiras de obtermos energia limpa, não apenas para preservar o nosso planeta e as espécies que nele habitam, mas para darmos uma vida melhor às pessoas e às futuras gerações que estão por vir. Outro propósito é de podermos tornar o Brasil, a médio ou longo prazo, uma das maiores potências mundiais, pois temos capacidade e é o que merecemos. Para podermos realizar essas ideias, é preciso de vontade e ajuda. Cabe ao governo melhorar a educação e o ensino nas escolas, criar mais projetos para o incentivo de crianças e jovens se interessarem mais pela ciência e pelas bem que ela traz a humanidade. Fazer mais investimentos em instituições e em pesquisas, nacionais ou em parceria com outros países, para que ajudem nos avanços nacionais e mundiais, em quaisquer áreas. Muito trabalho deve ser feito para que alcancemos estes objetivos, como Einstein disse uma vez: ***“O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.”***

Referências:

[1]Haq, Mahbub ul. 1995. Reflections on Human Development. New York: Oxford University Press.

[2]ARRUDA, Ana Carolina Rosolen de; JR, Rudinei Toneto. Análise dos Preços dos Serviços de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) praticados pelos municípios das regiões Sudeste e Sul do Brasil. Disponível em: http://www.fundace.org.br/campanha/citar_residuos_solidos.pdf Acesso em: 12 ago. 2015.

[3]Gaseificação de biomassa. Disponível em: <http://www.ipt.br/noticia/127.htm> Acesso em: 2 de ago. 2015.

[4]TAVARES, Odilon A. P. Fissão nuclear: energia farta disponível para a humanidade. Ciência e Sociedade, CBPF, v. 3, n. 2, p. 1-34, 2015.

[5]INVESTIGAÇÃO EM FUSÃO Uma Opção Energética para o Futuro da Europa. Disponível em: https://www.euro-fusion.org/wp-content/uploads/2011/11/fusion_research_portuguese.pdf Acesso em: 1 de mai. de 2015.

[6]PALANDI, Joecir; FIGUEIREDO, Dartanhan Baldez; DENARDIN, João Carlos; MAGNAGO, Paulo Roberto. FÍSICA NUCLEAR. Disponível em: <http://coral.ufsm.br/gef/Cadernos/FisiNuc.pdf> Acesso em: 11 de jul. de 2015.

[7]GARCIA, Antonio; SILVA, Danilo da; MATTOS, Diego. Energia Nuclear uma solução, ou uma bomba? Disponível em: file:///C:/Users/Lucas/Downloads/Diego%20de%20Mattos%20Candido_2007050_assignsub_mission_file_M.E.I_Energia%20Nuclear.pdf Acesso em: 13 de ago. 2015.

[8]OKUNO, Emico. Efeitos biológicos das radiações ionizantes. Acidente radiológico de Goiânia. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ea/v27n77/v27n77a14.pdf> Acesso em: 6 de ago. 2015.

[9]KNOLL, Glenn F. Radiation Detection and Measurement. 3 ed. Hoboken: John Wiley, 1999. p. 1.

[10]OKUNO, Emico. Epidemiologia do câncer devido a radiações e a elaboração de recomendações. Disponível em: http://acervo.abfm.org.br/rbfm/publicado/RBFM_v3n1_43-45.pdf Acesso em:30 de jul. de 2015.

[11]Radiação alfa, beta e gama. Disponível em: <http://www.alunosonline.com.br/quimica/radiacoes-alfa-beta-gama.html> Acesso em: 20 de ago. de 2015.

[12]MASILI, Gustavo Santos; ESTEVES, Rodrigo José Gomes Alay. USINA NUCLEAR. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/nuclear/nuclear.htm> Acesso em: 12 de ago. de 2015.

[13]CRITÉRIOS DE SEGURANÇA ADOTADOS PARA AS USINAS NUCLEARES ANGRA 1, ANGRA 2 E ANGRA 3. Disponível em: http://www.mma.gov.br/port/conama/reuniao/dir1529/CriteriosSeguranca_A123_JMDF.pdf Acesso em: 12 de ago. 2015.

[14]STURROCK, Peter A. Plasma Physics: An Introduction to the Theory of Astrophysical, Geophysical & Laboratory Plasmas. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

[15]Diversidade de Plasmas. Disponível em: http://www.plasma.inpe.br/LAP_Portal/LAP_Sitio/Texto/Diversidade_de_Plasmas.htm Acesso em: 12 de ago. de 2015.

[16]BOSCO, Edson Del. Fusão termonuclear controlada. Disponível em: http://evfita.ita.br/evfita2008/local_arquivos/Edson%20Del%20Bosco%20-%20III%20EVFITA.pdf Acesso em: 1 de ago. de 2015.

[17]A FUSÃO NUCLEAR CONTROLADA. Disponível em: http://objetoseducacionais2.mec.gov.br/bitstream/handle/mec/16309/05_teoriam.htm?sequence=23 Acesso em: 20 de ago. de 2015.

[18]MACIEL, Walter J. O Futuro do Sol. Disponível em: <http://www.astro.iag.usp.br/~maciel/teaching/artigos/futuro/futuro.html> Acesso em: 20 de ago. de 2015

[19]The Sun's Vital Statistics Stanford Solar Center. Citando Eddy, J. A New Sun: The Solar Results From Skylab. NASA, 1979. p. 37. NASA SP-402

[20]LASER GLASS. Disponível em: <https://lasers.llnl.gov/about/how-nif-works/beamline/amplifiers> Acesso em: 12 de ago. De 2015.

[21]Ignition Experiments. Disponível em: <https://lasers.llnl.gov/science/ignition/ignition-experiments> Acesso em: 20 de ago. de 2015.

[22]BALL, Philip. Laser fusion experiment extracts net energy from fuel. Revista Nature. Disponível em: <http://www.nature.com/news/laser-fusion-experiment-extracts-net-energy-from-fuel-1.14710> Acesso em: 24 de mar. de 2014.

[23]Fusion energy: NIF experiments show initial gain in fusion fuel. Disponível em: <http://phys.org/news/2014-02-nif-gain-fusion-fuel.html> Acesso em: 20 de ago. de 2015.

[24]Disponível em: <https://www.euro-fusion.org/downloads/> Acesso em: 1 de mai. De 2015.

[25] Clean, limitless fusion power could arrive sooner than expected. Disponível em: <http://www.extremetech.com/extreme/137520-clean-limitless-fusion-power-could-arrive-sooner-than-expected> Acesso em: 20 de ago. de 2015.

[26]Fusão a Frio para Principiantes. Disponível em: LENR-CANR.org Acesso em: 25 de jul. de 2015.

[27]Pesquisadores afirmam ter criado reator de fusão a frio. Disponível em: <http://hypescience.com/fusao-a-frio-mito-ou-grande-promessa/> Acesso em: 13 de ago. de 2015

[28]MILL, Hanks. Cold Fusion #1 Claims NASA Chief. Disponível em: http://pesn.com/2011/05/31/9501837_Cold-Fusion_Number-1_Claims_NASA_Chief/ Acesso em: 13 de ago. de 2015

[29]CABRERA, Carlos Eduardo Velasquez. AVALIAÇÃO NEUTRÔNICA DA INSERÇÃO DE UMA CAMADA TRANSMUTADORA EM UM SISTEMA TOKAMAK. Disponível em: http://vulcano.grude.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS-978JZ3/disserta__o_carlos.pdf?sequence=1 Acesso em: 6 de ago. de 2015.

[30]Angra 1. Disponível em: <http://www.eletronuclear.gov.br/aempresa/centralnuclear/angra1.aspx> Acesso em: 6 de ago. de 2015.

[31]Angra 2. Disponível em: <http://www.eletronuclear.gov.br/aempresa/centralnuclear/angra2.aspx> Acesso em: 23 de jul. de 2015.

[32]Central Nuclear de Angra dos Reis. Disponível em: <http://www.eletronuclear.gov.br/AEmpresa/CentralNuclear.aspx> Acesso em: 19 de jul. de 2015.

[33]Angra 3: energia para o crescimento do país. Disponível em: <http://www.eletronuclear.gov.br/aempresa/centralnuclear/angra3.aspx> Acesso em: 12 de ago. de 2015.

[34]Energia nuclear. Disponível em: <http://www.eletronuclear.gov.br/Saibamais/Espa%C3%A7oConhecimento/Pesquisaescolar/EnergiaNuclear.aspx> Acesso em: 13 de ago. de 2015.

[35]NIF CONSTRUCTION. Disponível em: <https://lasers.llnl.gov/about/nif-construction> Acesso em: 12 de ago. De 2015.

[36]Capital federal do Brasil tem o maior lixo fora da lei da América Latina. Disponível em: <http://g1.globo.com/bom-dia-brasil/noticia/2015/04/capital-federal-do-brasil-tem-o-maior-lixao-fora-da-lei-da-america-latina.html> Acesso em: 13 de ago. de 2015.

[37]Brasileiro produz 63 milhões de toneladas de lixo por ano. Disponível em: <http://www.opovo.com.br/app/opovo/brasil/2014/08/02/noticiasjornalbrasil,3292028/brasileiro-produz-63-milhoes-de-toneladas-de-lixo-por-ano.shtml> Acesso em: 10 de ago. de 2015.

[38]Muita grana vai para o tratamento do lixo. Disponível em: <http://www.abesmg.org.br/visualizacao-de-clippings/pt-br/ler/2747/muita-grana-vai-para-o-tratamento-do-lixo> Acesso em: 10 de ago. de 2015.

[39]Lixão x Aterro. Disponível em: <http://www.lixo.com.br/content/view/144/251/> Acesso em: 10 de ago. de 2015.

[40]Lixão X Aterro. Disponível em: http://www.lixo.com.br/index.php?option=com_content&task=view&id=144&Itemid=251 Acesso em: 20 de ago. de 2015.

[41]HENRIQUES, R. M. Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Abordagem Tecnológica. Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 2004.

[42]Disponível em: <http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=./energia/index.html&conteudo=./energia/artigos/pirolise.html> Acesso em: 22 de Dezembro de 2009.

[43]STINGHEN, Almicar O.. Co-processar, Incinerar, Aterrizar ou Pirolisar? Caso estudo: Resíduos PP, ABS, Borra Tinta. Disponível em: http://ecen.com/eee61/eee61p/tratamento_rediduos_tinta.htm Acesso em: 22 de Dezembro de 2009.

[44]Gaseificação. Disponível em: http://carvaomineral.com.br/interna_conteudo.php?i_subarea=16&i_area=2 Acesso em: 25 de jun. de 2015.

[45]NAKAJO, Luis. Lixo é convertido em energia elétrica por gerador de plasma. Disponível em: <http://www.usp.br/aun/imprimir.php?id=1832> Acesso em: 12 de ago. de 2015.

[46]Capacidade de Geração do Brasil. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm> Acesso em: 23 de jul. de 2015.

[47]Vantagens e Desvantagens das Usinas Nucleares. Disponível em: <http://coral.ufsm.br/gef/Nuclear/nuclear14.pdf> Acesso em: 23 de ago. de 2015.