

Energia nuclear, o que é necessário saber?

Nuclear energy, what you should know?

Claudinei Cerconi

Graduado em Física e Mestrando em Química Aplicada - UNICENTRO

Professor Ensino Médio da Rede Particular, Guarapuava, PR

cerconi@yahoo.com.br

Fábio Luiz Melquiades

Universidade Estadual do Centro-Oeste – UNICENTRO

Departamento de Física, Guarapuava, PR

fmelquiades@unicentro.br

Tânia Toyomi Tominaga

Universidade Estadual do Centro-Oeste – UNICENTRO

Departamento de Física, Guarapuava, PR

ttominaga@unicentro.br

Resumo: Energia nuclear consiste no uso controlado das reações nucleares para a obtenção de energia, tais núcleos, quando sofrem essa modificação, liberam uma quantidade expressiva de energia. Nos reatores nucleares, essa energia é aproveitada para gerar calor e na sequência energia elétrica pela movimentação de turbogeradores. Apesar dos grandes benefícios proporcionados pela energia nuclear para a população, ainda é um tema pouco divulgado. O objetivo deste artigo é explicar de forma simples, o princípio de funcionamento de uma usina nuclear e como, a partir da energia nuclear, obtem-se energia elétrica. As técnicas nucleares tradicionais e inovadoras são utilizadas nos mais diversos campos da atividade humana, tornando possível a realização de tarefas que por meios convencionais, hoje, seriam impossíveis de serem viabilizadas. A energia nuclear é muito utilizada na medicina, na agricultura, no meio ambiente e na indústria, principalmente, para a geração de energia elétrica. O sistema elétrico brasileiro, por ser predominantemente hídrico, é afetado profundamente pelas variações

climáticas. Para que o país não dependa das condições climáticas, novas fontes de energia para geração de energia elétrica devem ser utilizadas, como no caso da energia nuclear. Em âmbito nacional, atualmente, a parcela de utilização de energia nuclear para geração de energia elétrica é apenas 4,2%. Devido ao seu baixo impacto ambiental 16% da energia elétrica total gerada no mundo advém da energia nuclear, evita-se dessa maneira, grandes quantidades de poluentes, liberados pela queima de óleo combustível ou carvão.

Palavras-chave: energia nuclear; fissão; urânio.

Abstract: Nuclear energy consists in the controlled use of nuclear reactions to obtain energy, and when these nuclei undergo these changes they release a significant amount of energy. In the nuclei reactors, this energy is used to generate heat and electric energy by moving the turbogenerators. The benefits which the nuclear energy can afford to the population are not spread enough; traditional and new nuclear techniques are used in several areas of human activities, it makes possible to accomplish tasks that by conventional ways, would be impossible of being realized, nowadays. Nuclear energy is used in medical science, agriculture, environment and factories, mainly to generate electric energy. Brazilian electric system is predominantly hydraulic, and it is deeply affected by variances of climate. In order not to be dependable of climate conditions, the country needs to use new sources of energy to produce electric power, like nuclear energy, which is the topic of this research. In national range, the share of nuclear energy use to produce electric energy is 4.2 percent and in some countries like France and Lithuania, this percentage overcomes 8.0 percent, being the mainly source of electric energy generation for houses and factories, and the average nuclear energy is responsible by 16 percent of all the electric energy produced in the world and, because its lower environmental damage, it avoids the emission of big amounts of products which cause pollution that would be delivered if the suitable energy was generating burning fuel oil or carbon.

Key words: nuclear energy; fission; uranium.

1 Introdução

A energia nuclear consiste no uso controlado das reações nucleares para a obtenção de energia e tem inúmeras aplicações nos mais diferentes ramos do conhecimento, como na área da saúde, industrial, ambiental, militar, biológica[1]. Além disso, a energia nuclear é útil na geração de eletricidade em usinas de vários países do mundo. É peça fundamental na construção da bomba atômica, bomba de hidrogênio e outras armas nucleares. Entretanto, os grandes benefícios da energia nuclear ainda são pouco divulgados para a sociedade. O objetivo do artigo é explicar de forma simples, o princípio de funcionamento de uma usina nuclear e como, a partir da energia nuclear, obtém-se energia elétrica. Com isso, pretende-se contribuir para o esclarecimento da população sobre a geração de energia nuclear.

Apesar da energia nuclear ser uma fonte de energia limpa e barata, muitos ainda sentem que ela não pode ser uma forma de energia alternativa viável para substituir o uso de combustível fóssil ou energia solar. A principal causa é o perigo dos resíduos radioativos e das possibilidades de acidentes nucleares. Contudo, a energia nuclear vem sendo utilizada com muita frequência na geração de energia elétrica, causando menores impactos ambientais e gerando menos poluentes que outros tipos de usinas geradoras de eletricidade.

Nas técnicas nucleares, são utilizados isótopos radioativos ou radioisótopos que interagem com a matéria. A radiação emitida pode atravessar a matéria ou ser absorvida por ela, possibilitando assim múltiplas aplicações.

As células ou microorganismos nocivos à nossa saúde podem ser destruídos quando absorvem essa radiação. Essa propriedade, que normalmente é inconveniente para os seres vivos, pode ser usada em nosso benefício. Um exemplo disso está na medicina que se utiliza das fontes de radiação para destruição de tumores; em outro exemplo temos radiofármacos que são utilizados com a finalidade de diagnóstico, terapia e pesquisa. Faz-se uso, também, da radioesterilização, técnica em que se aplica radiação sobre equipamentos cirúrgicos e tecidos humanos destinados a transplantes com fim de esterilização[2].

A agricultura se beneficia da energia nuclear pela irradiação de alimentos, prevenindo, assim, o brotamento, retardando a maturação, principalmente de vegetais, aumentando o tempo de conservação. Na pesquisa, o uso de traçadores radioativos permite estudar o metabolismo de plantas e o comportamento de insetos[3].

Na indústria, é utilizada numa técnica chamada gamagrafia, semelhante a uma radiografia de peças metálicas ou de estruturas sólidas, que detecta defeitos e rachaduras em peças e componentes de difícil acesso ou muito pesadas para serem transportadas. No meio ambiente, são aplicadas algumas técnicas nucleares para avaliar a distribuição de recursos hídricos, a química e física dos solos e superfícies, os sedimentos marinhos, a vegetação e sítios arqueológicos. Os radioisótopos permitem identificar e acompanhar a trajetória de poluentes na atmosfera, no mar, nos rios ou no solo[4].

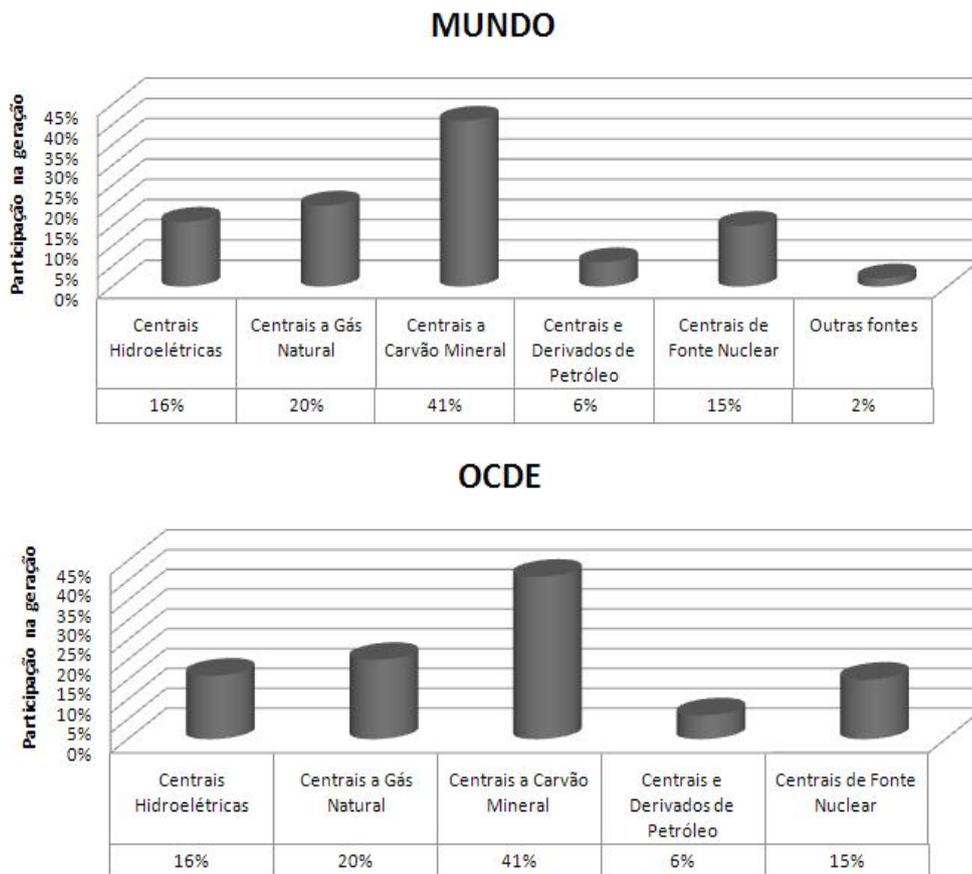
A energia nuclear, em cerca de quatro décadas, tornou-se a terceira fonte mais utilizada para a produção de energia elétrica a nível mundial (Figura 1), ficando muito próximo da segunda fonte, a energia hidroelétrica. Já nos países industrializados da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico – OCDE (ou na sigla original OECD), ocupa o segundo lugar no método de obtenção de energia elétrica[5].

Evidenciando, dessa maneira, que a energia nuclear constitui-se em uma tecnologia que contribuiu e continua a contribuir em muito no balanço energético mundial. Atualmente a produção de energia é um tema extremamente discutido devido à sua importância para o desenvolvimento de um país e formas alternativas para produção de energia estão crescentemente sendo pesquisadas.

Assim, é de fundamental importância, que a população seja informada acerca dos atuais desenvolvimentos na área energética, e em particular, na área nuclear. Este é o motivo pelo qual nos propusemos à realização deste trabalho, que está organizado da seguinte forma: Na seção II, discutimos o crescimento da opção pela Energia Nuclear; na seção III, são apresentadas as vantagens da utilização de energia da Fissão; na seção VI, são apresentadas as etapas do ciclo do combustível; na seção VII, é descrito o processo de Fissão Nuclear; na seção VIII, é explicado

como uma reação nuclear se mantém, processo conhecido por Reação em Cadeia; e finalmente, na seção IX, apresentamos a conclusão do trabalho apresentado.

Figura 1. Dados de geração de energia no mundo e na região da OCDE. Dados 2007



2 Crescimento da opção pela energia nuclear

2.1 Dados gerais de geração de energia elétrica por fonte nuclear

Atualmente, a energia nuclear é responsável por cerca de 15% do total de energia elétrica produzida no mundo. Para colocar em perspectiva, no mesmo

período, a contribuição da energia hidroelétrica na produção de energia elétrica em todo mundo foi de cerca de 16% conforme indica a figura 1.

A tabela 1 mostra a distribuição da capacidade e geração por fonte nuclear em regiões geográficas, bem como a porcentagem que esse tipo de energia representa em diferentes países. Verifica-se que 69% da energia nucleoeleétrica produzida no mundo concentra-se na Europa Ocidental e na América do Norte. O Japão sozinho gera mais energia nucleoeleétrica do que a região do Leste Europeu, incluindo Rússia e os demais países da antiga União Soviética.

Tabela 1. Distribuição da capacidade e geração nucleoeleétrica [5]. Dados 2007

Produtores	TWh	% Mundial	Capacidade Instalada	GW	País	% Nuclear
Estados Unidos	816	29,2	Estados Unidos	99	França	79,1
França	450	16,1	França	63	Suécia	46,7
Japão	303	10,8	Japão	48	Ucrânia	46,7
Alemanha	167	6,0	Rússia	22	Coreia	37,0
Rússia	156	5,6	Alemanha	20	Japão	28,0
Coreia	148	5,3	Coreia	17	Alemanha	27,0
Canadá	98	3,5	Ucrânia	13	Reino Unido	19,1
Ucrânia	90	3,2	Canadá	13	E.U.A.	19,0
Reino Unido	75	2,7	Reino Unido	10	Rússia	16,0
Suécia	67	2,4	Suécia	9	Canadá	16,0
Demais Países	422	15,1	Demais Países	55	Demais Países	7,2

Fonte: [5]

A tabela 2 mostra que a Europa Ocidental, com cerca de 30% da produção total de energia elétrica gerada por centrais nucleares, é a região que mais utiliza a energia nuclear em termos relativos. Seguem-se a América do Norte com cerca de 18% e o Extremo Oriente e Europa Oriental com cerca de 15% cada. Constituiu-se em um sucesso considerável que, apenas cinquenta anos após a primeira “pilha

atômica” ser colocada em funcionamento, em Chicago, a energia nucleoeletrica seja a principal fonte de produção de energia elétrica na Europa Ocidental (veja Tabela 2).

De acordo com o Conselho Mundial de Energia, o crescimento da população mundial e o desenvolvimento econômico resultarão num aumento de 150% a 300% do consumo de energia primária no mundo em 2050[5]. A eletricidade como recurso energético de uso final, vantajoso e flexível, terá seu consumo, no mínimo, duplicado no mesmo período. Além disso, possivelmente, todo o crescimento populacional esperado durante os próximos 30 anos estará concentrado nas áreas urbanas.

Tabela 2. Capacidade instalada e produção total de energia nuclear [5]. Dados de 2007

Região	Capacidade Total GWe	Produção Total TWh	Capacidade Nuclear GWe	Produção Nuclear TWh	Participação Nuclear (*)(%)
América do Norte	924	4380	107,2	797,0	18,2
América Latina	234	978	2,9	20,6	2,1
Europa Ocidental	644	2868	126,1	849,2	29,6
Europa Oriental	458	1634	45,3	254,6	15,6
África	101	398	1,8	13,5	3,4
Oriente Médio e Sul da Ásia	242	1036	2,0	11,5	1,1
Sudeste da Ásia e Pacífico	125	568	Indisponível	Indisponível	Indisponível
Extremo Oriente	633	3048	63,7	452,1	14,8
MUNDO	3361	14910	349,0	2398,5	16,1

(*) Participação nuclear (%) = [geração nucleoeletrica/geração total] x 100

Fonte: [5]

A produção e o suprimento de energia levantam questões cruciais na maioria dos países. As preocupações com os impactos ambientais causados pelas atividades humanas, e a tentativa de se minimizar os efeitos de possíveis crises econômicas nos mercados de energia, são cada vez mais crescentes. Neste contexto, é essencial a diversificação das fontes energéticas e a antecipação dos investimentos, implicando em uma forte necessidade de políticas energéticas a longo prazo.

Muitos países industrializados, após uma análise de suas necessidades energéticas, capacidades de produção e requisitos ambientais, estão reconhecendo as características positivas da energia nuclear, como uma fonte de eletricidade capaz de preencher uma parcela significativa de suas matrizes energéticas.

Na Europa, uma análise de país a país mostra um caminho contrastante para a energia nuclear no continente. A Alemanha e a Bélgica recentemente ordenaram a interrupção gradual da geração nuclear, mas, porque já garantiram o futuro da operação de suas usinas nucleares para os próximos trinta anos. Na França, o desempenho das usinas nucleares e da indústria do ciclo do combustível nuclear consolidaram a política de investimentos feita nos últimos trinta anos. Nos Estados Unidos, houve uma mudança no clima econômico e político. A tecnologia nuclear passou a ser considerada necessária, já havendo planos para a construção de novos reatores nos próximos dez anos. Na Ásia, o desenvolvimento da energia nuclear é contínuo, e o apoio à geração nucleoeletrica, assim chamada a energia elétrica gerada por fonte nuclear, é mais forte, com vários reatores em construção e outros em projeto, principalmente no Japão, China, Coreia do Sul e Índia[1].

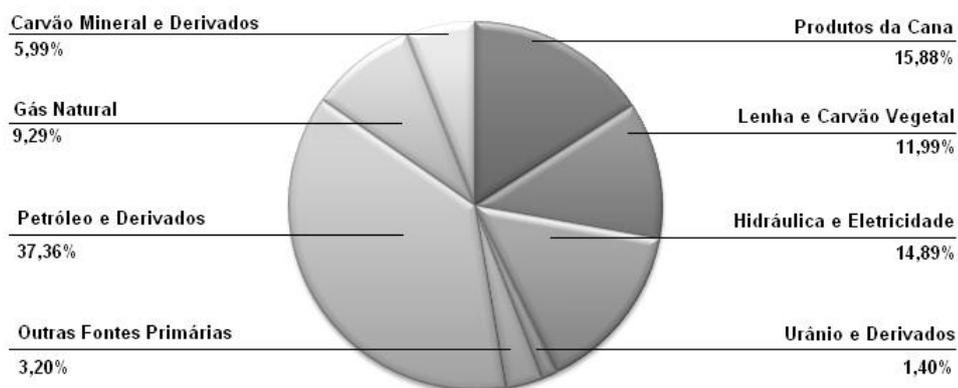
Essa tendência positiva ajudará a remover o preconceito relativo ao futuro da tecnologia nuclear. Essa convicção é fortalecida por um fator econômico visto que, as usinas nucleares em operação, provaram ser bem sucedidas dentro do novo e mais competitivo ambiente de geração elétrica, tanto nos Estados Unidos como na Europa. Os progressos operacionais resultaram em um aumento da eficiência, menores custos de operação, elevados padrões de desempenho e segurança, os quais permitiram operar com mais rentabilidade, mesmo sob pressão competitiva. O processo de extensão da vida útil de usinas nucleares certamente aumentará esses benefícios. Fazendo com que todas as tecnologias energéticas estejam aprimorando

seu desempenho operacional, e a indústria nuclear terá que permanecer neste atual círculo virtuoso. Sendo, dessa maneira, obrigada a manter sua competitividade e sua sustentabilidade, além de fornecer respostas técnicas convincentes às dúvidas da população relativas à opção nuclear. Este setor industrial é jovem, capaz de expressivas realizações, e demonstra uma contínua e ampla capacidade de inovação. Os objetivos atribuídos a esta nova organização nuclear incluem preços competitivos de suprimento de energia, utilização eficiente dos recursos naturais, atendimento aos requisitos de segurança e a mínima geração de rejeitos de material nuclear.

2.2 Energia nuclear no Brasil – dados de consumo

A energia elétrica é fator essencial para assegurar o crescimento econômico do país e a qualidade de vida da sua população, porém, os recursos hídricos disponíveis nas proximidades dos principais centros consumidores estão se esgotando. Além disso, os licenciamentos ambientais dos aproveitamentos hídricos remanescentes e economicamente viáveis estão se tornando cada vez mais difíceis. No quadro geral de geração de energia no Brasil, entre todas as formas comercialmente viáveis, o percentual de participação por fonte nuclear e de outras fontes é mostrado na figura 2, verifica-se o baixo aproveitamento com relação ao urânio e seus derivados, apenas 1,40%.

Figura 2. Estrutura da participação de diversas fontes de energia no Brasil. Dados 2007



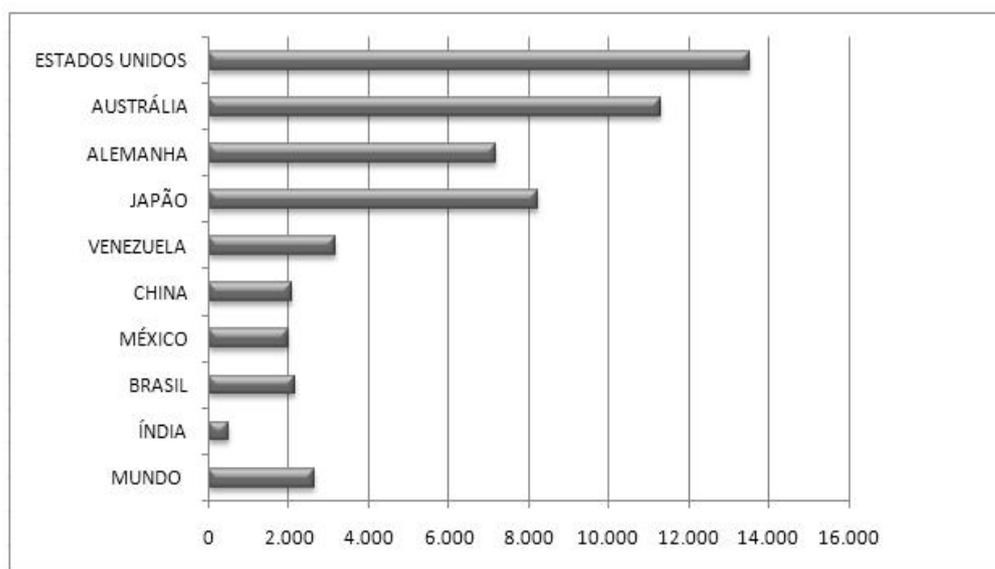
Fonte: Ministério de Minas e Energia

O Brasil possui a sexta maior reserva mundial de urânio e instalações industriais do Ciclo do Combustível, operadas pela INB (Indústrias Nucleares do Brasil), que nos garante independência no suprimento de combustível nuclear. O quadro acima assegura às usinas nucleares um importante papel na matriz energética nacional.

Segundo a INB, com o aumento da extração de urânio, a quantidade será suficiente para suprir a demanda de combustível das usinas nucleares brasileira, Angra 1, 2 e 3 e de mais oito usinas de 1 GW, previstas no Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030), para suprir a exigência dos 8GW à matriz energética brasileira, mantendo-se o atual crescimento do PIB em torno de 5,2% anual[6].

O consumo de energia elétrica por habitante no Brasil (aproximadamente 2.000 kWh/hab) é muito baixo quando comparado com países mais desenvolvidos (cerca de 8.000 kWh/hab no Japão, 7.000 kWh/hab na Alemanha e 13.500 kWh/hab nos Estados Unidos)[1] e, portanto, o país precisa de novas fontes de energia para assegurar o seu crescimento industrial e o bem-estar da população, figura 3.

Figura 3. Consumo per Capita de Eletricidade em 2006 em kWh/habitante



Fonte: [7]

Em 2002, as usinas nucleares do Brasil, Angra I e Angra II produziram juntas um total de 13,8 TWh. Quando entrar em operação, Angra III produzirá aproximadamente 10 TWh por ano[8]. Com essa produção, o Brasil ocupará o 25º lugar no *ranking* Participação da Energia Nuclear na Produção de Energia Elétrica, conforme mostra tabela 3.

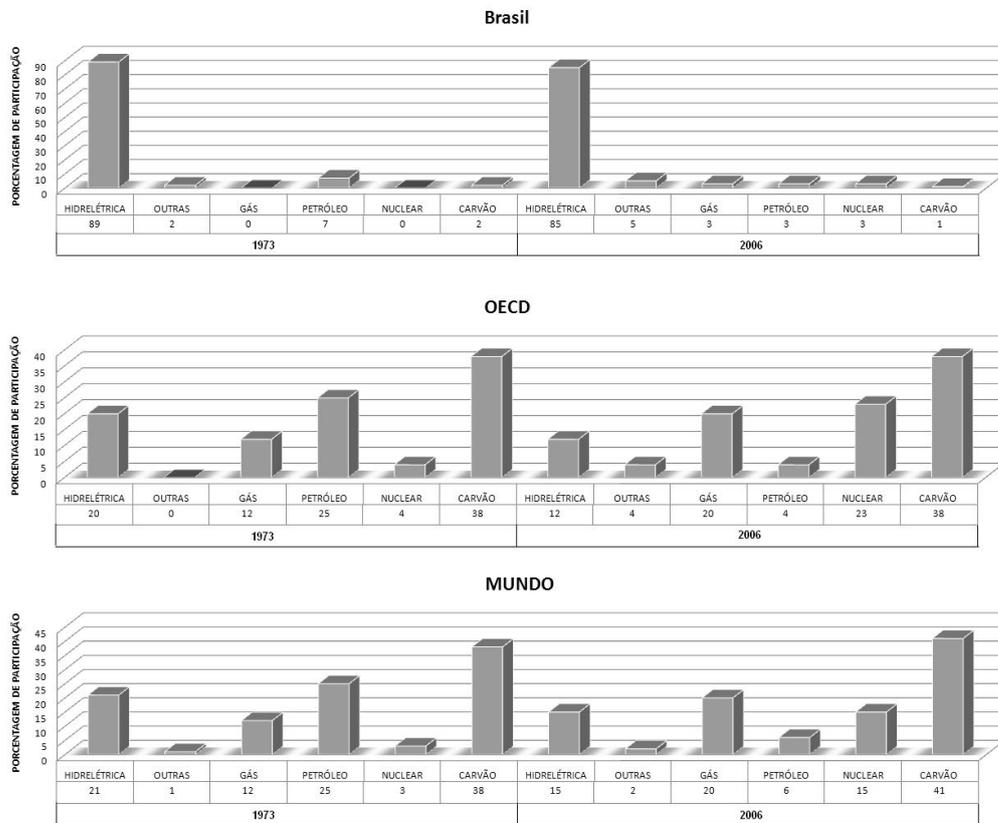
Tabela 3. Participação da Energia Nuclear na Geração de Energia Elétrica

País	Total Produção	País	Total Produção	País	Total Produção
Lituânia	80%	Republica Coréia	39%	Canadá	12%
França	78%	Hungria	36%	Romênia	10%
Bélgica	57%	Japão	35%	Argentina	7%
Republica Eslovaca	55%	Alemanha	30%	África do Sul	6%
Bulgária	47%	Finlândia	30%	Brasil	4%
Suécia	46%	Espanha	26%	Holanda	4%
Ucrânia	46%	Republica Checa	25%	Índia	4%
Armênia	41%	Reino Unido	22%	México	4%
Eslovênia	41%	Estados Unidos	20%	Paquistão	3%
Suíça	40%	Rússia	16%	China	1%

Fonte: [1]

Na figura 4, temos a evolução da matriz de oferta de eletricidade num comparativo com os anos de 1973 e 2006, no Brasil, na OECD e no mundo em porcentagem [4].

Figura 4. Comparativo da evolução da matriz energética do Brasil, OECD e Mundo



Fonte: [7]

3 Vantagens da utilização de energia nuclear para geração de energia elétrica

Os aspectos ambientais da indústria nuclear como um todo, incluindo a produção de energia elétrica e toda a indústria do ciclo do combustível nuclear, compara-se favoravelmente com as alternativas existentes para a produção de energia elétrica em grandes quantidades.

A energia nuclear tem desempenhado um papel importante para a proteção do meio ambiente. As experiências de vários países no que se refere a impactos positivos da energia nuclear sobre o meio ambiente demonstram que a energia nuclear apresenta várias vantagens.

Em relatório recente elaborado pela Associação Brasileira de Energia Nuclear (ABEN), embasado por estudos de universidades da Alemanha e da Suíça e do governo do Reino Unido, há uma comparação das emissões diretas e indiretas de CO₂ decorrentes de sete fontes de geração de energia elétrica, conforme tabela 4.

Tabela 4. Emissão de CO₂ durante a geração de energia elétrica por diversas fontes de geração

Fonte geradora de energia elétrica	Emissão de CO ₂ em gramas por quilowatt-hora (g/kWh)	
	Menor Nível	Maior Nível
Nuclear	05	33
Hidrelétrica	04	36
Eólica	10	38
Solar	78	217
Gás Natural	399	644
Óleo Combustível	550	946
Carvão	838	1.231

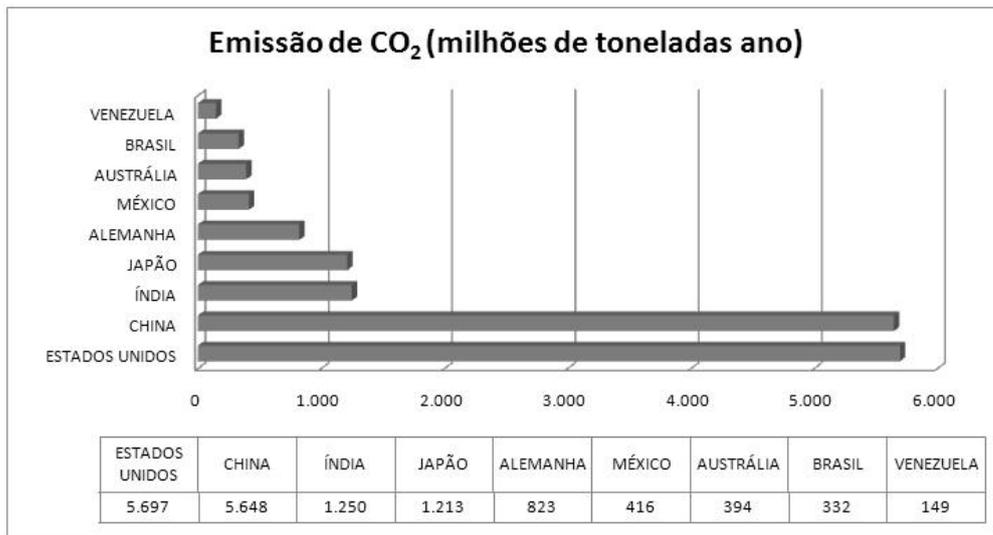
Fonte: [6]

A figura 5 demonstra a emissão de CO₂ em alguns países no ano de 2006, os valores apresentados são referentes a milhões de toneladas descartadas na atmosfera, verifica-se que 52% das emissões mundiais são devidas aos Estados Unidos, China, Japão, Índia e Alemanha.

A energia nuclear é uma forma de energia que não emite alguns poluentes, principalmente gases prejudiciais a camada de ozônio, tais como o dióxido de carbono, metano e óxido nitroso, e nenhum gás causador de chuva ácida como dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio. A energia nucleoeletrica, também, não emite nenhum metal carcinogênico, como outras fontes alternativas, que é o caso das usinas que utilizam combustível fóssil, pois liberam material teratogênico ou mutagênico, entre eles Arsênio, Mercúrio, Chumbo, Cádmiio. A utilização da energia nuclear também não libera gases ou partículas que causam poluição urbana.

Teoricamente, se fossem utilizadas centrais a carvão modernas e eficientes para gerar os 16% do total de energia elétrica produzida por centrais nucleares em todo o mundo, seriam emitidos adicionalmente cerca de 2,4 bilhões de toneladas de CO₂ por ano ou 1,8 bilhões de toneladas CO₂ por ano, caso a energia nucleoeletrica fosse substituída por uma mistura de usinas a óleo, carvão e gás conforme as características próprias de cada país. A Conferência de Toronto sobre Mudanças Climáticas, de junho de 1988 recomendou uma redução das emissões anuais de 4-5 bilhões de toneladas de CO₂ até 2005 a partir do nível atual de 20-25 bilhões de toneladas emitidas anualmente [1].

Figura 5. Emissões de CO₂ em alguns países no ano de 2006 (milhões de Toneladas)



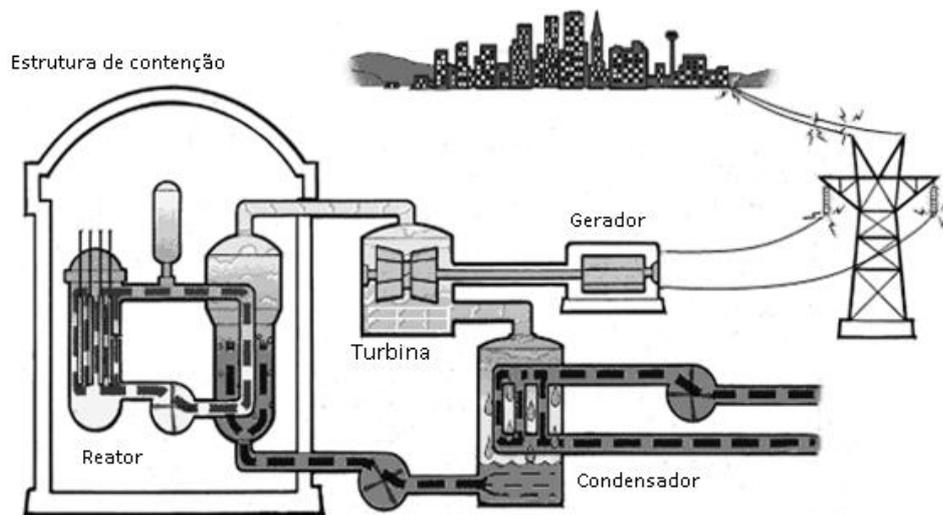
Fonte: Ministério de Minas e Energia

A energia nuclear substituiu, no período, 1973-1995, o equivalente a 10,1 bilhões de barris de petróleo, de 1,6 trilhões de m³ de gás natural, e 8,9 bilhões de toneladas de carvão. Assim no período 1973-1995 foram evitadas as emissões de 22,4 bilhões de toneladas de CO₂, 218 milhões de toneladas de dióxido de enxofre e 98 milhões de toneladas de óxidos de nitrogênio [5].

4 Método para obtenção da energia elétrica por fonte nuclear

A energia elétrica gerada por uma fonte nuclear é obtida a partir do calor da reação do urânio. A queima¹ do combustível produz calor que ferve a água de uma caldeira transformando-a em vapor. O vapor movimenta uma turbina que dá partida a um gerador que produz a eletricidade. A figura 6 esquematiza esta sequência.

Figura 06. Esquema de uma Usina Nuclear



Fonte: [8]

Nos reatores as reações acontecem de maneira controlada, enquanto que nas bombas atômicas a reação em cadeia² processa-se integralmente em um tempo muito curto, liberando de modo explosivo toda a energia armazenada no material fissionável³, urânio ou plutônio.

^{1a} O termo queima se refere ao processo de fissão de núcleos de urânio que causa a liberação de uma quantidade significativa de energia.

^{2a} Reação em cadeia é uma sequência de reações de fissão nuclear, provocadas por um nêutron ou grupo de nêutrons, que gera novas reações entre os núcleos envolvidos.

³ Material fissionável é a quantidade de elemento fissionável que é capaz de sustentar uma reação em cadeia de fissão nuclear.

Um átomo é composto por um núcleo e pelos elétrons que ocupam a região ao redor do núcleo, que são muito leves e têm carga elétrica negativa. Dentro do núcleo, há dois tipos de partículas, os prótons e os nêutrons. O número de prótons é sempre igual ao número dos elétrons, num átomo eletricamente neutro, mas sua carga é positiva. Os nêutrons variam em número sendo mais numerosos quanto mais pesado for o átomo, e são eletricamente neutros. No urânio presente na natureza são encontrados átomos, que têm em seu núcleo 92 prótons e 143 nêutrons (cuja soma é 235), átomos com 92 prótons e 142 nêutrons (234) e outros ainda, com 92 prótons e 146 nêutrons (238). Como o número de prótons e elétrons é sempre igual (92), pode-se dizer que esses são quimicamente iguais e são chamados de isótopos do mesmo elemento. Para diferenciá-los, usa-se o símbolo químico do elemento e no canto esquerdo um número, de acordo com seu peso atômico⁴, da seguinte forma ${}^Z\text{U}$, onde Z é a soma do número de prótons e o número de nêutrons. No caso do Urânio: ${}^{234}\text{U}$, ${}^{235}\text{U}$ e ${}^{238}\text{U}$.

O choque de um nêutron livre com o isótopo ${}^{235}\text{U}$ causa a divisão do núcleo desse isótopo em duas partes, e ocasiona uma liberação relativamente alta de energia. Dá-se a esse fenômeno o nome de fissão nuclear⁵.

5 Teoria da tecnologia da fissão nuclear - contexto histórico

A descoberta do processo da fissão ocorreu no fim da década de trinta, como resultado de uma longa sequência de estudos de físicos nucleares. Os cientistas alemães Otto Hahn e Fritz Strassmann relataram um experimento envolvendo a irradiação de nêutron do urânio no início de 1939. Subsequentemente, Otto Frisch e Lise Meitner interpretaram o experimento como a fissão do urânio em elementos mais leves. A possibilidade de uma autosustentação da reação em cadeia era aparente, e provocou um ímpeto adicional para acelerar as pesquisas [10].

⁴ Peso atômico refere-se à massa atômica de um isótopo (muitas vezes chamada simplesmente de massa atômica), à massa atômica de um elemento químico (massa atômica relativa) ou de uma substância.

⁵ Fissão nuclear é a quebra do núcleo de um átomo, geralmente de grande massa atômica, em dois núcleos menores e mais leves, normalmente seguidas da emissão de partículas (nêutrons, alfa, beta) e radiação gama.

Pesquisas secretas foram realizadas em países como Estados Unidos, para aplicações militares da fissão nuclear, que começaram com a 2ª Guerra Mundial. O desenvolvimento de uma arma exigiu que a autosustentação da reação de fissão fosse desenvolvida e, futuramente, que uma quantidade adequada de material fissionável fosse produzida para ser utilizado na confecção de uma arma. Em 2 de Dezembro de 1942, na Universidade de Chicago, um grupo dirigido por Enrico Fermi criou, com sucesso, o primeiro reator do mundo a chegar ao estado de autosustentação, ou “crítico”. O reator era abastecido com urânio natural embebido em blocos de grafite e o isótopo utilizado foi ^{235}U .

O urânio natural contém apenas 0,71% de ^{235}U , enquanto o restante dos 99,29% do urânio é ^{238}U , o qual não é fissionável, exceto com nêutrons altamente energizados, que são indisponíveis para o processo de fissão. Na produção de uma bomba, era necessário providenciar concentrações muito maiores de ^{235}U , ou “urânio enriquecido”, e por fim, uma forma de difusão gasosa para ser usada na separação de ^{235}U e ^{238}U . Ultimamente, a solução encontrada foi a difusão gasosa que era utilizada na separação dos dois materiais. Uma maneira alternativa de se obter materiais para armas é usar um núcleo fissionável diferente, por exemplo o isótopo sintético do Plutônio, ^{239}Pu , formado quando o ^{238}U reage com nêutrons para produzir ^{239}U . O ^{239}U é radioativo e decai em dois passos para produzir ^{239}Pu . Na produção do plutônio, um grande reator é necessário para irradiar o ^{238}U .

Uma vez que Fermi demonstrou que um reator crítico era exequível, um esforço maior era necessário na construção de reatores para produzir plutônio. A decisão de desagrupar as informações nucleares relatada ao oposto de argumentar aplicações pacíficas foi criada pelo Presidente Dwight D. Eisenhower e anunciada em sua palestra sobre “Átomos para a paz” nas Nações Unidas em dezembro de 1953[1]. Outras nações se uniram na procura de usos pacíficos para o átomo, e a primeira conferência internacional sobre energia nuclear ocorreu em Geneve em 1955. Nos Estados Unidos, a Comissão de Energia Atômica, fundada em 1946 para descobrir utilidades paisanas para a energia nuclear, foi responsável por pesquisas em vários conceitos sobre o reator que levaram ao nascimento da indústria civil. A Inglaterra entrou na produção de eletricidade através da energia

nuclear em 1956 [11]. A primeira usina nuclear (de eletricidade) soviética veio a funcionar em 1954, e os franceses começaram a produção de suas primeiras usinas comerciais em 1957[10].

Em 1968, o Governo Brasileiro decidiu ingressar no campo da produção da energia nucleoeletrica, com o objetivo primordial de propiciar ao setor elétrico a oportunidade de conhecer esta moderna tecnologia e adquirir experiência para fazer frente às possíveis necessidades futuras. A construção de Angra I foi iniciada em 1972, em Angra dos Reis no estado do Rio de Janeiro, a primeira reação em cadeia foi estabelecida em 1982 e a usina entrou em operação comercial em 1985. Desde então, já gerou mais de quarenta milhões de MWh, energia equivalente ao consumo aproximado de vinte milhões de habitantes ao longo de um ano, ou de um milhão de habitantes ao longo dos seus vinte anos de vida. Mais tarde, em meados de 2001, entrou em operação Angra II, segunda usina nuclear instalada no Brasil.

Atualmente, estão em operação as usinas Angra 1, com capacidade para geração de 657 megawatts de eletricidade, e Angra 2, com potência de 1.350 megawatts de eletricidade. Angra 3, que será praticamente uma réplica de Angra 2 (incorporando os avanços tecnológicos ocorridos desde a construção desta usina), está prevista para gerar 1.400 megawatts.

As duas usinas nucleares da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAEA), no município de Angra dos Reis, são operadas pela Eletronuclear S/A, com a capacidade instalada total de 2.007 MW. Essa energia chega aos principais centros consumidores do país e corresponde a aproximadamente 3% da energia elétrica consumida no Brasil e 50% da eletricidade consumida no Estado do Rio de Janeiro.

As duas usinas de Angra I e Angra II, que estão em funcionamento, contribuíram em muito na produção de energia elétrica no Brasil, gerando até fevereiro de 2006 mais de 100 milhões MWh de energia juntas. A tabela 5 fornece os valores da produção de energia por fonte nuclear das usinas em operação até o momento no país. Dados referentes aos anos de 2000 a 2007.

Tabela 5. Dados de energia elétrica produzida por fonte nuclear no Brasil

Geração Bruta das Usinas Angra I e II (em MWh)			
Angra I		Angra II	
2000	3.423.307,6	2000	sem operação
2001	3.853.499,2	2001	9.835.527,2
2002	3.995.104,0	2002	9.841.746,2
2003	3.326.101,3	2003	10.009.936,1
2004	4.124.759,2	2004	7.427.332,2
2005	3.731.189,7	2005	6.121.765,5
2006	3.399.426,4	2006	10.369.983,8
2007	2.708.723,5	2007	9.656.675,3

Fonte: [6]

6 Etapas do ciclo do combustível

O elemento químico urânio é um metal encontrado em formações rochosas da crosta terrestre. Na usina de beneficiamento, o urânio é extraído do minério, purificado e concentrado sob a forma de um sal de cor amarela, conhecido como *yellowcake*, matéria prima para produção da energia gerada em um reator nuclear.

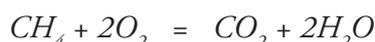
Na usina de conversão, o urânio sob a forma de *yellowcake*, é dissolvido e purificado, obtendo-se então o urânio nuclearmente puro. A seguir, é convertido para o estado gasoso, o hexafluoreto de urânio (UF_6), a partir do qual se obtém enriquecimento do urânio. Nesta etapa aumenta-se a concentração do ^{235}U acima do natural, que é de apenas 0,71% de ^{235}U , para em torno de 3%, o que permite sua utilização como combustível para geração de energia elétrica.

O hexafluoreto de urânio enriquecido (UF_6) é então transformado em dióxido de urânio (UO_2). A reconversão é o retorno do gás UF_6 ao estado sólido, sob a forma de pó de UO_2 . É a reconversão que permite a sua utilização como combustível. Este pó é transformado em pastilhas de UO_2 , que possuem a forma de um cilindro com cerca de um centímetro de comprimento. Estas são então submetidas a diversos testes - dimensionais, metalográficos e químicos - para então compor o elemento combustível.

Após o processo de maturação da pastilha, sob temperaturas de 1750°C são montados os elementos combustível, compostos pelas pastilhas de dióxido de urânio montadas em tubos de uma liga metálica especial. Um elemento combustível tem capacidade de fornecer energia para cerca de 42.000 residências médias durante um mês [9].

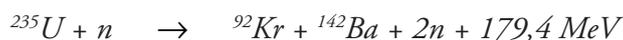
7 Fissão nuclear

Os processos que alteram o estado ou composição da matéria são inevitavelmente acompanhados pelo dispêndio ou geração de energia. Processos comuns como a combustão produzem energia pelo rearranjo químico dos átomos ou moléculas. Por exemplo, a combustão do metano (gás natural) é representada pela seguinte reação [12]:



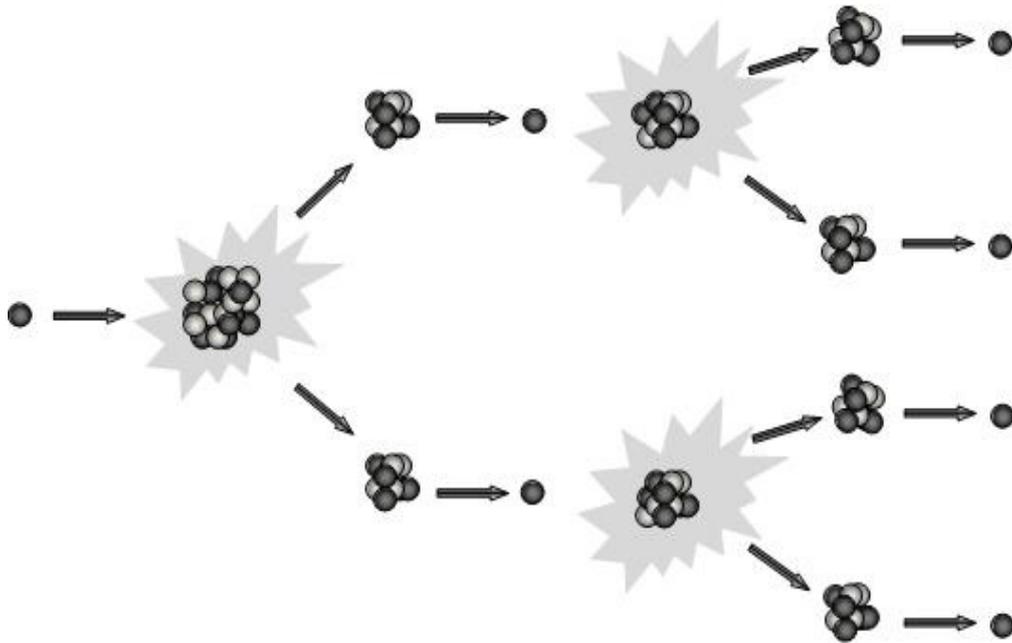
Neste exemplo, a energia produzida é de 8 elétrons-volt (eV). O elétron-volt é uma unidade de energia que representa o ganho de energia cinética quando um elétron é acelerado pela queda do potencial em um volt.

A mais conhecida reação nuclear é a fissão. Um esquema de fissão está representado na figura 7, na qual um núcleo pesado se combina com um nêutron e se separa em dois outros núcleos mais leves. Uma típica reação de fissão envolvendo o ^{235}U é:



em que a energia liberada é de aproximadamente 200 MeV (milhões de eletron-volt), um fator de 25 milhões de vezes superior ao da reação da combustão do metano.

Figura 7. Esquema de fissão nuclear. Esferas pretas representam o nêutron e esferas cinza o próton



Fonte: [12]

A captura de um nêutron pelo ^{235}U produz um estado excitado do ^{236}U , o qual possui energia mais do que suficiente para dividi-lo em dois fragmentos. Por outro lado, a energia crítica para a fissão do ^{239}U é 5,9 MeV, mas a captura de um nêutron por um núcleo de ^{238}U produz uma energia de excitação de apenas 5,2 MeV. Assim, quando um nêutron térmico é capturado pelo ^{238}U para formar ^{239}U , a energia de excitação não é suficiente para que a fissão ocorra. Neste caso, o núcleo excitado de ^{239}U volta ao estado fundamental emitindo raios gama ou partículas alfa (α) [1].

Todos os núcleos com $Z > 83$ são radioativos. Entre os vários modos possíveis de decaimento dos núcleos muito pesados ($Z > 90$) está a fissão espontânea. Estes núcleos podem se dividir em dois fragmentos mesmo que não absorvam um nêutron. Podemos compreender a fissão espontânea usando a analogia de uma gota de líquido com cargas positivas. Quando a gota não é muito grande, a tensão superficial é suficiente para manter a gota coesa, apesar das forças de repulsão que existem entre as cargas. Existe, porém, um tamanho máximo a partir do qual a gota se torna instável e se parte espontaneamente em duas, já que a força de repulsão

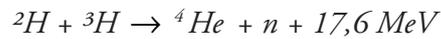
é proporcional ao número de cargas, que, por sua vez, é proporcional ao volume e, portanto ao cubo do raio da gota, enquanto a tensão superficial é proporcional à área da superfície e, portanto ao quadrado do raio da gota. A possibilidade de fissão espontânea estabelece um limite superior para o tamanho dos núcleos e, portanto para o número de elementos da tabela periódica. É preciso observar que a probabilidade de fissão espontânea dos núcleos naturais é muito pequena em relação aos outros modos possíveis de decaimento. Assim, por exemplo, a meia-vida⁶ do ^{238}U em relação ao decaimento α γ é de $4,5 \times 10^9$ anos, enquanto a meia-vida em relação à fissão espontânea é 10^{16} anos.

O mesmo núcleo pode se fissionar de muitas formas diferentes, produzindo fragmentos de diferentes tamanhos. Dependendo da reação, também podem ser emitidos um, dois ou três nêutrons. O número médio de nêutrons emitidos na reação de fissão do ^{235}U induzida por nêutrons térmicos é 2,4 [13]. A fissão é acompanhada pela emissão imediata de um ou mais dos nêutrons em excesso, seguida pelo decaimento β (veja na sequência) dos fragmentos de fissão para reduzir ainda mais o número de nêutrons. Em consequência, alguns nêutrons são emitidos espontaneamente imediatamente após a fissão e outros são convertidos em prótons por emissão β . A força de repulsão eletrostática faz com que os fragmentos sejam arremessados em direções opostas com energia cinética elevada; colisões com os outros átomos transformam subsequentemente energia em energia térmica. A fissão libera energia de aproximadamente 200 MeV por núcleo. Trata-se de uma quantidade muito grande de energia. Em uma reação de combustão, por exemplo, apenas 4 eV são liberados por molécula de oxigênio consumida.

O decaimento beta ocorre com a emissão de partículas beta (β), assim chamados os elétrons (ou pósitrons) com grande quantidade de energia emitidos de núcleos atômicos. Existem duas formas de decaimento beta, β^- e β^+ . No decaimento β^+ , um próton é convertido num nêutron, com a emissão de um pósitron e de um neutrino. No decaimento β^- , um nêutron é convertido num próton, com emissão de um elétron e de um antineutrino (a antipartícula do neutrino).

⁶ Meia-vida de um radioisótopo é o tempo necessário para desintegrar a metade da massa deste isótopo, que pode ocorrer em segundos ou em bilhões de anos, dependendo do grau de instabilidade do radioisótopo.

Outra importante reação nuclear é a fusão, na qual dois elementos leves se combinam para formar um átomo mais pesado. Uma importante reação é:



em que a energia liberada pela reação é próxima de dezoito milhões de eV. A fusão nuclear é um processo de produção de energia a partir do núcleo de um átomo. Este fenômeno ocorre naturalmente no interior do Sol e das estrelas. Núcleos leves como o do hidrogênio e seus isótopos, o deutério e o trítio, se fundem e criam elementos de um núcleo mais pesado, como o hélio.

Usinas termonucleares aproveitam a enorme energia liberada por reações nucleares para a produção de energia em alta escala. Em uma moderna usina de carvão, a combustão de uma libra (453,59g) de carvão produz 1 quilowatt hora (kWh) de energia elétrica. A fissão de uma libra de urânio em uma moderna usina nuclear produz cerca de três milhões de kWh de energia elétrica[14]. É a incrível densidade da energia (energia por unidade de massa) que faz as fontes de energia nuclear serem tão interessantes. No presente, apenas o processo de fissão é utilizado na produção comercial de energia (geralmente para produzir eletricidade). As pesquisas sobre a fusão ainda não produziram uma tecnologia de produção de energia economicamente factível.

8 Fator de produção e reação em cadeia

Para que uma reação nuclear seja auto-sustentada, é preciso que, em média, pelo menos um dos nêutrons emitidos pela fissão do ${}^{235}\text{U}$ seja capturado por outro núcleo de ${}^{235}\text{U}$ e provoque a fissão deste segundo núcleo. O *fator de reprodução* de um reator, representado pela letra k , é definido como o número médio de nêutrons resultantes de fissões que produzem novas fissões. No caso do ${}^{235}\text{U}$, o número máximo possível de k é 2,4, mas este número normalmente é bem menor, por duas razões principais: (1) alguns nêutrons escapam da região que contém os núcleos fissionáveis; (2) alguns nêutrons são capturados por núcleos não-fissionáveis. Quando k é exatamente igual a 1, a reação é auto-

sustentada; quando k é menor que 1, a reação não prossegue. Quando k é maior que 1, o número de fissões aumenta rapidamente e a reação se torna “explosiva”. É o que acontece nas bombas nucleares. Nos reatores nucleares para produção de energia, o valor de k é mantido muito próximo de 1, veja esquema na figura 8, onde os fragmentos de fissão estão representados apenas para as primeiras quatro fissões. O número médio de nêutrons produzidos é 2,5 por fissão. Neste exemplo, $k = 1,6$. Observe que embora existam quarenta nêutrons no diagrama, basta absorver dois destes nêutrons para que o fator de produção seja reduzido para $k = 1$, o valor necessário para que a reação se mantenha estável. Quando k é exatamente igual a 1, dizemos que o reator está crítico; quando $k < 1$, que está *subcrítico*; quando $k > 1$, que está *supercrítico* [12,14].

Como os nêutrons emitidos na fissão em geral têm energias da ordem de 1 MeV ou maiores, enquanto a seção de choque para captura de nêutrons é muito maior para baixas energias, a reação em cadeia só se mantém se os nêutrons perderem energia antes de escaparem do reator.

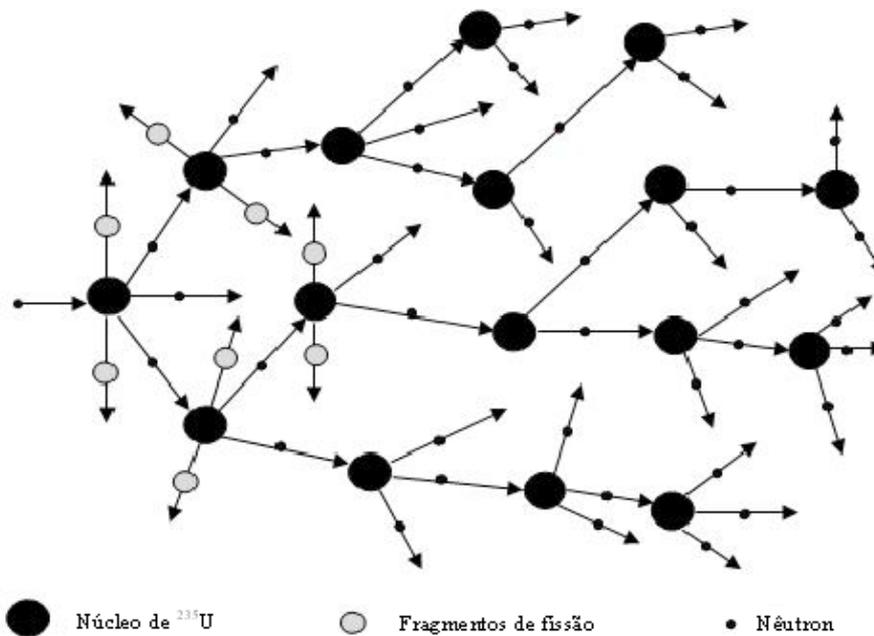
Os nêutrons de alta energia (1 a 2 MeV) perdem rapidamente energia através de colisões inelásticas com o ^{238}U , o isótopo mais abundante do urânio natural. Depois que a energia dos nêutrons cai abaixo de 1 MeV, o principal processo de perda de energia passa a ser o espalhamento elástico, no qual um nêutron colide com um núcleo em repouso e, para respeitar a lei de conservação do momento, transfere parte de sua energia cinética para o núcleo. Este processo de transferência de energia só é eficiente quando as massas dos dois corpos são da mesma ordem; em uma colisão elástica, um nêutron não transfere muita energia para um núcleo de ^{238}U , que tem uma massa muito maior. Este tipo de colisão é análogo à colisão de uma bola de gude com uma bola de sinuca; a bola de gude é desviada pela bola de sinuca, mas a energia cinética permanece praticamente inalterada [12].

Por esta razão, costuma-se colocar um material de baixa massa atômica, como água ou grafite, conhecidos como moderador, no núcleo do reator, para reduzir a energia dos nêutrons, aumentando assim a probabilidade de fissão antes que os nêutrons escapem do reator. Os nêutrons perdem energia através de colisões com o moderador.

9 Conclusão

É importante conhecer mais profundamente o funcionamento de uma usina nuclear visto que ela tem grandes possibilidades de ser a forma de energia mais usada num futuro próximo. As usinas nucleares fornecem hoje um sexto de toda eletricidade consumida no mundo. Ao lado das usinas hidrelétricas (que fornecem pouco mais que isso), são a principal fonte de energia que não poluem o ambiente com a emissão de dióxido de carbono.

Figura 8. Representação esquemática de uma reação em cadeia do ^{235}U , onde os fragmentos de fissão estão representados para as quatro primeiras fissões.



Fonte: [13]

O uso da tecnologia de reatores nucleares para geração de eletricidade foi afetada por acidentes como o de Chernobyl (Ucrânia), criando certo receio na população mundial, quanto a sua utilização para geração de energia elétrica, mas, recentemente, vem apresentando notável nível de confiabilidade e eficiência. A grande quantidade de urânio existente no planeta poderia suprir os reatores de usinas nucleares e de pesquisas, bem como uso militar, com combustível nuclear por muitos anos, alimentando esses reatores durante sua vida útil (entre quarenta e cinquenta anos).

10 Referências

- [1] International Agency of Energy Atomic – Agência Internacional de Energia Atômica.
- [2] CARDOSO, E. M. *Aplicações da Energia Nuclear*. Comissão Nacional de Energia Nuclear. Disponível em: www.cnen.gov.br. Acesso em: 20 dez. 2008.
- [3] _____. *Energia Nuclear*. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Disponível em: www.cnen.gov.br. Acesso em: 22 dez. 2008.
- [4] MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA – MCT. Disponível em: <http://www.mct.gov.br>. Acesso em: 16 jan. 2009.
- [5] IAEA NUCLEAR TECHNOLOGY REVIEW 2004, e-book. IAEA, Vienna, Austria, 2004.
- [6] REVISTA BRASIL NUCLEAR, ABEN, Rio de Janeiro, ano 13, n. 31, Edição junho de 2007.
- [7] BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2007 - Ano base 2006 do Ministério de Minas e Energia. Disponível em: www.mme.gov.br. Acesso em: 20 dez. 2008.
- [8] ELETRONUCLEAR - Eletrobrás Termonuclear S/A. Disponível em: www.eletronuclear.gov.br. Acesso em: 20 dez. 2008.
- [9] INDÚSTRIA NUCLEAR DO BRASIL S.A. Disponível em: www.inb.gov.br. Acesso em: 20 dez. 2008.
- [10] KAPLAN, I., *Física Nuclear*, Addison Wesley Publishing Company Inc., 1978.
- [11] WHITE, H., *Introducción a La Física Atomica y Nuclear*, Alhambra S.A. – 1970.
- [12] TIPLER, P. A., *Física Moderna* 3. ed. LTC, 2001.
- [13] BLATT, J. M., *Theoretical Nuclear Physics*, John Wiley & Sons Inc., 1952.
- [14] CHUNG, K.C., *Introdução à Física Nuclear*, UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.