

Energia elétrica via fusão termonuclear controlada

Filipe Wiltgen

Programa de Mestrado em Engenharia, Universidade de Taubaté.

Taubaté, Brasil.

filipe.wiltgen@unitau.br

RESUMO: Os seres humanos precisam de muita eletricidade em suas vidas diárias. Mas a maioria de nossas fontes tradicionais de eletricidade ainda são ineficientes e escassas, e muitas vezes dependem do "humor" da própria natureza. A tecnologia de fusão termonuclear nascida nas décadas de 1930 e 1940 é independente da vontade da natureza, eficiente e abundante. Porém, e como tudo na natureza, tem vantagens e desvantagens. A raça humana amadureceu a tecnologia nuclear do passado, mas prefere investir em um processo físico mais seguro e eficiente como a fusão nuclear. O fato é que o futuro a cada dia da energia elétrica parece estar entrelaçado e dependente de resultados científicos e técnicos obtidos com os avanços da fusão termonuclear controlada. Este artigo discute sua importância, suas máquinas, suas dificuldades científicas, bem como os benefícios e cuidados necessários para o uso consciente dessa tecnologia. O fato de existirem diferentes tecnologias para a obtenção da reação de fusão explica como a fusão nuclear é um importante mecanismo para a energia do futuro, localizando desenvolvimentos no passado, presente e futuro na obtenção de eletricidade. Mostra como a reação de fusão nuclear é capaz de gerar muita energia e, portanto, produzir muita eletricidade por meio do processo núcleo-elétrica de forma eficiente e segura. Discute os tipos promissores de confinamentos magnéticos para produção de fusão e suas respectivas máquinas em operação no mundo. Finalmente, ele apresenta e discute o caminho que a humanidade traçou para implementar a engenharia de fusão termonuclear controlada para obter o primeiro reator de fusão nuclear da história até o ano 2025 com uma máquina Tokamak.

PALAVRAS-CHAVE: Energia. Eletricidade. Fusão Termonuclear Controlada. Confinamento Magnético. Reatores. Fusão Nuclear. Tokamak.

ABSTRACT: Human beings need a lot of electricity in their daily lives. But most of our traditional sources of electricity are still inefficient and scarce, and often dependent on the "mood" of nature itself. thermonuclear fusion technology born in the 1930s and 1940s is independent of nature's will, efficient and abundant. However, and like everything in nature has advantages and disadvantages. The human race has matured nuclear technology of past, but prefers to invest in a safer and more efficient physical process like nuclear fusion. The fact is that every day future of electric power seems to be intertwined and dependent on scientific and technical results obtained with advances of controlled thermonuclear fusion. This article discusses its importance, its machines, its scientific difficulties, as well as benefits and care necessary for conscious use of this technology. The fact that there are different technologies for obtaining the fusion reaction explains how nuclear fusion is an important mechanism for energy of the future, locating developments in past, present and for future in obtaining electricity. It shows how nuclear fusion reaction is capable of generating a lot of energy, and thus, producing a lot of electricity through nuclear-electrical process efficiently and safely. Discusses the promising types of magnetic confinements for production of fusion and their respective machines in operation in world. Finally, it presents and discusses path that humanity has traced to implement controlled thermonuclear fusion engineering to obtain the first nuclear fusion reactor in history by year 2025 with a Tokamak machine.

KEYWORDS: Energy. Electricity. Controlled Thermonuclear Fusion. Magnetic Confinement. Reactors. Nuclear Fusion. Tokamak.

1. Introdução

Em um planeta no qual os recursos naturais conhecidos parecem se exaurir mais rápido do que o esperado, e há necessidade constante de energia elétrica abundante para o desenvolvimento humano no futuro [1], a alternativa da fusão termonuclear nunca foi tão importante. A pouca eficiência na conversão útil de energia elétrica obtida das fontes renováveis, somada à gradativa diminuição do uso, exploração e das reservas de

combustíveis fósseis [2] e [3] põe em destaque as pesquisas tecnológicas dos futuros reatores a fusão nuclear.

As primeiras pesquisas envolvendo energia nuclear amplamente divulgadas ao público em geral foram relacionadas a dispositivos bélicos de destruição em massa na época. Este fato foi uma anti-propaganda de todos os benefícios que a energia nuclear possui para humanidade. A sombra de cogumelos radioativos das bombas lançadas no final da Segunda Guerra Mundial sobre o Japão, parece estar muito presente ainda hoje

mais de 70 (setenta) anos depois. A visão da humanidade a respeito da utilização nuclear sempre foi marcada pelos acidentes e a constante ameaça de nações nuclearmente militarizadas [4], [5] e [6].

Os benefícios da utilização nuclear na exploração espacial, na medicina, na engenharia e na conversão para produção de eletricidade, ficam à margem das notícias e das opções no desenvolvimento humano [5], [6] e [7]. As condições de vida da raça humana no planeta estão cada vez mais entrelaçadas com a constante abundância na disposição e no fornecimento de energia elétrica. Os equipamentos e dispositivos eletrônicos e eletromecânicos nunca foram tão importantes como neste período histórico da recente história da humanidade [1]. A relação dos seres humanos e a eletricidade é tão profundamente enraizada que até mesmo os registros dos menores níveis de mortalidade infantil, assim como, maior longevidade e melhor educação, correspondem diretamente com os países mais desenvolvidos, e que por sua vez disponibilizam, e consomem, cada vez mais energia elétrica por habitante [8], [9] e [10].

O primeiro reator a fissão nuclear surgiu na *Universidade de Chicago* [11], pouco tempo depois do término da Segunda Guerra Mundial e com o fim do *Projeto Manhattan* [12] e [13], responsável por abrigar algumas das melhores mentes científicas do mundo na época, com a finalidade de desenvolver, construir e testar as primeiras armas nucleares para frear o avanço dos nazistas. Entretanto, como é conhecido, as armas nucleares ficaram prontas após a derrota dos nazistas na Europa, o que levou os EUA utilizar estas armas contra o Império Japonês e aterrorizar todo o planeta.

A opção da energia elétrica nuclear não descarta de forma alguma a contribuição de todas as outras fontes de energia elétrica tradicionais, muito pelo contrário, pois ao que tudo indica a crise energética de eletricidade vai se agravar, e isso ocorrerá muito rápido ainda nesta década [3]. As fontes renováveis de energia apesar de pouco eficientes, serão também muito úteis e necessárias. Entretanto, deve-se ter a consciência de que qualquer uma destas fontes atuais de energia elétrica, e mesmo todas juntas, nunca vão ser o suficiente para suprir as necessidades humanas no ritmo atual de consumo elétrico. A opção mais racional, e que foi amplamente

discutida entre os anos de 1990 e 2000 foi a nuclear, incluindo a opinião do renomado pesquisador e criador da *Hipótese de Gaia*, Lovelock [14]. Em seus estudos Lovelock [14] observou a necessidade de desenvolver as tecnologias para o uso seguro da energia núcleo-elétrica como a principal opção energética mundial.

Atualmente, as novas gerações de reatores a fissão permitem minimizar os problemas apesar de os resíduos nucleares ainda existirem e que são um inconveniente intrínseco e perigoso a ser contido. Espera-se que, com o tempo, os atuais reatores a fissão nuclear venham a ser substituídos em breve pelo tão esperado reator a fusão nuclear. Os futuros reatores a fusão nuclear devem tornar a operação núcleo-elétrica intrinsecamente segura, abundante e muito eficiente.

A partir de agora, este artigo apresentará de forma objetiva e sintética a reação de fusão nuclear, suas máquinas e dispositivos conversores de energia, suas características e operações, vantagens e desvantagens de cada tecnologia e o que esperar, e escolher, para o futuro da energia elétrica para a humanidade.

2. Reação de fusão nuclear

Dentre os processos físicos nucleares utilizados pela própria natureza para transformar energia, a fissão e a fusão nuclear são os de maior eficiência [7]. O processo mais comum de produção de energia no cosmos é o de fusão nuclear, que é o processo utilizado pelas estrelas para transformar seu combustível em energia. Em uma estrela o processo de fusão nuclear produz hélio a partir de hidrogênio, no qual dois prótons se fundem em uma partícula alfa (um núcleo de hélio), liberando dois pósitrons, dois neutrinos e uma enorme quantidade de energia. Entretanto, aqui no planeta Terra o processo de fusão nuclear é muito difícil de ser obtido, enquanto que o processo de fissão nuclear é bem mais fácil de ser obtido [5], [7], [8], [9] e [10].

Na fusão nuclear, como o próprio nome sugere, dois átomos são unidos. Apesar de parecer simples, e de que a natureza utilize este processo rotineiramente, a fusão nuclear no planeta Terra impõe aos pesquisadores dificuldades tecnológicas muito grandes [15].

O maior problema de obter a fusão nuclear na

Terra está relacionado a baixa gravidade terrestre, isso faz com que as temperaturas necessárias para haver o ambiente de colisão para a fusão nuclear seja alguns milhares de graus Celsius maior do que a temperatura do Sol (~100 milhões de graus Celsius). Isso porque os átomos possuem uma barreira eletrostática muito forte, chamada de *Barreira de Coulomb*. Sem romper esta barreira não é possível fundir dois átomos para formar um novo átomo fundido [16], [17], [18] e [19].

Para romper a barreira eletrostática, os átomos devem estar com um alto grau de agitação térmica, além de estarem dissociados em elétrons e íons o que permite grande movimentação cinética, o que só pode ser obtida com as elevadas temperaturas em estado físico de plasma [17]. Entretanto, isto não é tudo. É necessário também manter esta condição de alta temperatura em um tempo mínimo, e com uma densidade mínima para que as reações nucleares possam ocorrer. Isto é conhecido na física como as três condições de simultaneidade para a obtenção da fusão nuclear (temperatura, densidade e tempo de confinamento) [20].

A esta temperatura, o estado físico da matéria é o plasma (4º estado físico da matéria, que são no total atual cinco estados físicos conhecidos), e nenhum material na Terra pode entrar em contato físico direto com este estado de alta temperatura [17], [18], [21] e [22]. A forma de manter o confinamento deste ambiente de alta temperatura e no estado físico de plasma, pode ser obtido através da aplicação de intensos campos magnéticos, ou através das micro-implosões de *pellets* com laser de alta potência.

Quando ocorre o processo de fusão nuclear, dois átomos bem leves como Deutério e/ou Trítio se colidem a uma grande velocidade e com muita energia cinética. Energia suficiente para romper a barreira eletrostática de *Coulomb* presente em cada um dos átomos ionizados (dissociados em elétrons e íons) e assim se fundirem em um novo átomo de hélio. Durante este processo tem-se a emissão de um nêutron e o desprendimento de uma quantidade gigantesca de energia [5], [23] e [24].

Em um reator a fusão nuclear o processo deverá ser similar ao de um reator de fissão nuclear no que diz respeito a troca de calor para a conversão em energia elétrica, ou seja, o calor produzido na reação será

extraído por trocadores de calor produzindo o vapor que vai acionar uma turbina conectada a um gerador elétrico convencional e produzir eletricidade [5].

Dessa forma, o aparato tradicional de uma central nuclear a fissão no que diz respeito a produção de eletricidade, será similar ao reator a fusão, porém um reator a fusão nuclear não consegue se descontrolar durante a reação e produzir uma reação nuclear em cadeia. Isto porque, fora do ambiente de alta temperatura, densidade e de confinamento magnético, a reação se extingue naturalmente, ou seja, o processo é intrinsecamente seguro sob este aspecto [5], [6] e [20].

3. Dispositivos de investigação científica para obter a fusão nuclear

Os reatores nucleares são dispositivos científicos que comprovadamente foram sedimentados com bons resultados em pesquisas científicas, que podem e devem ser comercializados, pois seu amadurecimento e maturidade tecnológica permitem seu uso contínuo, prolongado e frequente [25]. Em geral são equipamentos e máquinas que possuem elevado nível de TRL (TRL 9 - *Technology Readiness Levels*).

O órgão mais importante referente a assuntos nucleares é a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA - *International Atomic Energy Agency* - www.iaea.org) com sua sede localizada em Viena na Áustria. A IAEA é a agência regulatória mundial para a cooperação no campo nuclear, promovendo o uso seguro e pacífico da tecnologia nuclear.

No processo de fusão nuclear, os dispositivos científicos ainda estão sendo testados. Muitos laboratórios espalhados pelo mundo, incluindo o Brasil (INPE, USP e UNICAMP) realizam pesquisas em máquinas de fusão nuclear para conseguir obter avanços científicos para um reator [6], [26], [27] e [28].

O reator a fusão nuclear como todo dispositivo de conversão de energia, deve ser capaz de devolver mais energia do que toda a energia consumida em seu funcionamento. Este ponto no qual um dispositivo de investigação científica passa a ser um reator é conhecido como *Break Even Point* (Ponto de Equilíbrio ou de Virada). Acredita-se que uma máquina de confinamento

magnético do plasma chamada de *Tokamak* ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor* - www.iter.org) venha a ser o primeiro a alcançar o ponto de virada dos experimentos a fusão nuclear, abrindo o caminho para a construção do primeiro reator a fusão nuclear do tipo *Tokamak* que é chamado de DEMO. isso a partir de 2025.

O ITER [29] é um consórcio internacional que une os esforços de múltiplos países que pesquisam e financiam juntos o desafio de obter a fusão nuclear na Terra. A máquina do tipo *Tokamak* é de origem Russa remonta a década de 30. Na **figura 1**, é possível ver uma ilustração de como será o *Tokamak* ITER quando estiver pronto.

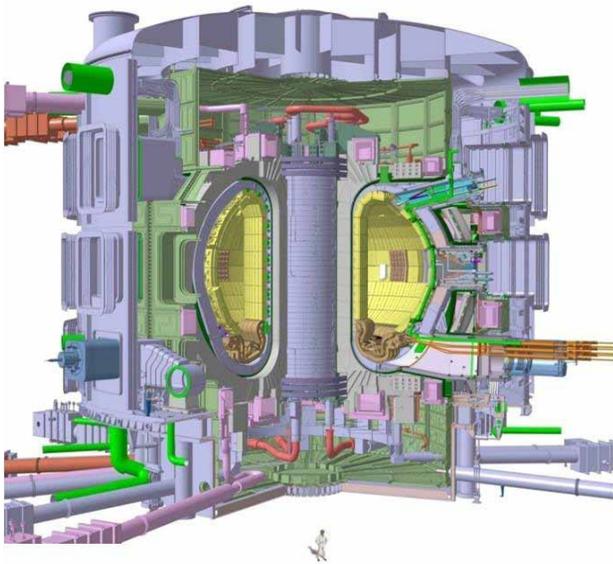


Fig. 1 – Tokamak ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Fonte: [29].

Como se sabe, ainda não existem reatores a fusão nuclear, o mundo todo busca pelo reator a fusão nuclear em laboratórios de física de plasmas desde a década de 30. Esta busca é motivada principalmente pela enorme eficiência na conversão de massa em energia calculada de uma reação termonuclear controlada. Durante este período muitas máquinas foram testadas e algumas se mostraram promissoras no caminho para a fusão nuclear. Atualmente, existem basicamente dois caminhos que são seguidos para se obter a fusão nuclear.

O primeiro caminho que surgiu com as pesquisas nos laboratórios foi o de confinamento magnético,

isso porque, como o ambiente é muito quente (estado físico de plasma), o plasma não pode ficar em contato com nenhum material do planeta Terra. O plasma por estar ionizado, ou seja, dissociado em íons e elétrons é possível ser contido com campos eletromagnéticos, permitindo inclusive o movimento das partículas dentro do confinamento. Estes campos magnéticos permitem confinar o plasma para que ele fique restrito apenas na região de interesse da pesquisa científica.

Na *Técnica de Confinamento Dinâmico*, usando campos magnéticos, existem dois dispositivos com diferentes princípios de funcionamento no foco das investigações, os *Tokamaks* e os *Stellarators*.

Um outro caminho para a fusão nuclear que tem sido investigado nos últimos 20 anos é o do confinamento inercial. O confinamento inercial, como o nome diz, é obtido com um pequeno objeto estático no formato de uma esfera (*Pellet*) que é preenchido com átomos de Deutério. Para obter a fusão nuclear com o confinamento inercial, utiliza-se potentes fontes de laser disparadas simultaneamente na microesfera criando uma microimplosão que comprimem o Deutério até que a pressão, a temperatura e a densidade sejam tais, que os átomos de Deutério dentro da microesfera possibilitem ocorrer a reação de fusão nuclear.

Na *Técnica de Confinamento Inercial*, usando potentes lasers, existem dois dispositivos com diferentes princípios de funcionamento no foco das investigações, os com *Laser Direto* e os com *Laser Indireto*.

4. Fusão nuclear por confinamento dinâmico (confinamento magnético)

O confinamento dinâmico para a fusão nuclear é uma forma elegante de conseguir conter uma determinada quantidade de matéria em um ambiente de alta temperatura, no qual uma coluna de plasma em movimento circula dentro de uma câmara de vácuo no formato toroidal que permite a circulação contínua. Os dois dispositivos experimentais que fazem isso são os *Tokamaks* e os *Stellarators*.

Os *Tokamaks* são dispositivos discretos (pulsados), ou seja, produzem uma coluna de plasma a cada disparo de fontes de energia elétrica sobre suas bobinas magnéticas; algumas bobinas servem para produzir o plasma e outras para

confinar a coluna no local desejado. Entretanto, no *Tokamak* a coluna de plasma é envolta por um campo magnético helicoidal, devido a composição de campos toroidais e poloidais, que circunda a coluna de plasma como se estivesse amarrando-a. A cada disparo do *Tokamak* uma nova coluna de plasma se forma dentro do dispositivo. Observe a **figura 2**, a coluna de plasma dentro da câmara de vácuo do *Tokamak* [5], [16], [20], [29], [30] e [31].

Os *Stellarators* são dispositivos contínuos, ou seja, produzem uma coluna de plasma torcida durante um determinado período de tempo muito longo. Suas bobinas são muito diferentes das bobinas de um *Tokamak*; elas possuem a forma geométrica dos campos magnéticos permitindo desta forma manter a coluna de plasma torcida por longos períodos de tempo circulando na câmara de vácuo. A complexidade construtiva de um *Stellarator* é muito maior do que de um *Tokamak*. É possível notar na **figura 2** que cada bobina do *Stellarator* possui uma forma geométrica diferente da outra e assim, compõe um campo magnético estável que permite manter a coluna de plasma na região de interesse durante um longo período de tempo [8], [9], [10], [32] e [33].

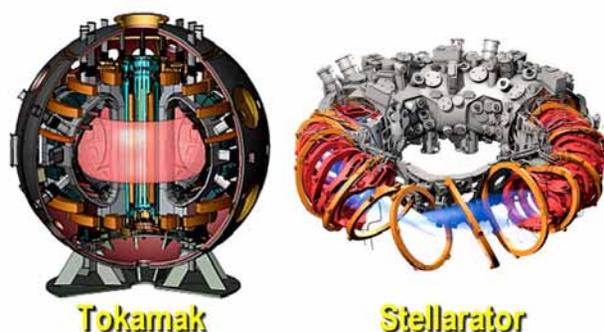


Fig. 2 – complexidade dos dispositivos de investigação científica para fusão nuclear por confinamento magnético do plasma (Tokamak e Stellarator). Fonte: [8].

5. Fusão nuclear por confinamento inercial (confinamento por micro-implosão)

O confinamento inercial é a forma encontrada por pesquisadores para tentar obter a fusão nuclear através da aplicação massiva de diversos feixes de laser disparados simultaneamente sobre uma microesfera preenchida em seu

interior com Deutério. A intenção é comprimir a microesfera realizando uma microimplosão que fará com que os átomos de Deutério dentro da microesfera venham a realizar o processo de fusão nuclear e gerar grandes quantidades de energia como nos experimentos a confinamento dinâmico do plasma [34].

Existem dois experimentos nos EUA que utilizam a técnica de Confinamento Inercial, o *Laser LLE OMEGA* [34] e [35] que possui múltiplos disparos de laser de forma direta sobre a microesfera de Deutério e a comprimem para obter a fusão nuclear, e o experimento *Laser NIF* [36], [37] e [38] que utiliza múltiplos feixes de laser disparados simultaneamente mas de forma indireta possibilitando maior uniformidade na compressão esférica do *pellet* (microesfera) de Deutério.

Na **figura 3** é possível observar uma ilustração dos dois processos de confinamento inercial a laser.

Esses experimentos têm obtidos avanços significativos na compressão do *pellet* nos últimos anos, mas ainda não obtiveram o sucesso esperado.

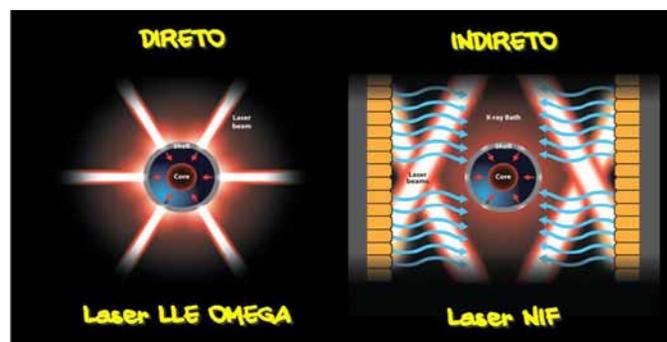


Fig. 3 – Dispositivos de investigação científica para fusão nuclear por confinamento inercial a micro-implosões de pellets a laser (LLE OMEGA e NIF). Fonte: [9].

6. Reator de fusão termonuclear controlado

6.1 Processo físico de conversão núcleo-elétrica

A conversão núcleo-elétrica é baseada na utilização do calor gerado pelo processo nuclear, quer seja fissão ou fusão. Esta fonte de energia primária térmica é utilizada na forma de calor transferido para circuitos trocadores de calor. Dependendo da necessidade de segurança no funcionamento podem ser utilizados vários circuitos trocadores de calor, ou seja muitos estágios, além de

inúmeros tipos de fluidos transportadores de calor [5].

Nem todo o calor gerado no processo nuclear consegue ser extraído; parte é transferido para circuitos de refrigeração do núcleo do reator no caso da fissão nuclear. No caso da fusão nuclear, acredita-se que se a produção não for contínua, como é o caso das máquinas do tipo *Tokamak*, pulsada com disparos. É prevista uma camada externa no dispositivo que permanecerá aquecida durante muito tempo (cobertor de Lítio), permitindo que os trocadores de calor possam ficar em funcionamento transportando o calor por longos períodos após cada disparo; isso acontece porque não existe um núcleo em um futuro reator a fusão [5], [23] e [24].

Quando o calor chegar ao último estágio de troca de calor é produzido vapor que será entregue a uma turbina a vapor que estará conectada a um gerador elétrico capaz de produzir eletricidade. O controle seguro de uma central núcleo-elétrica é de extrema importância para seu funcionamento [39].

É em uma sala de controle similar a essa que as decisões a respeito do aquecimento do núcleo e da eficiência da central são constantemente avaliadas pelos operadores a fim de evitar algum tipo de incidente ou acidente operacional.

Para reatores a fusão nuclear o processo tecnológico é um pouco mais complicado devido às necessidades de produzir o próprio combustível nas reações termonucleares a fusão conhecidas como interação D-T (*Deutério-Trítio*) antes de ser possível operar com a interação D-D (*Deutério-Deutério*). Essa última é ainda mais difícil de ser obtida devido às altíssimas temperaturas necessárias, muito acima da interação D-T [6] e [20].

Em um futuro reator a fusão nuclear, ao que tudo indica, será baseada na tecnologia de Confinamento Magnético do Plasma em máquinas do tipo *Tokamak*. Durante os muitos anos de pesquisa científica neste tipo de máquina, um experimento do tipo *Tokamak* foi o primeiro a obter fusão nuclear no planeta Terra [5], [6], [27], [40] e [41].

O experimento do Reino Unido em 2018 possui no Laboratório de Culham (Culham Centre for Fusion Energy - www.culham.org.uk) chamado de JET (Joint European Torus - www.euro-fusion.org) possui até os dias de hoje a maior quantidade de energia termonuclear produzida por fusão, acima de 16 MWth (térmico) em 22 de setembro de 1997 [5]. Na **figura 4**, observa-se uma das propostas para o

arranjo esperado em um reator a fusão nuclear.

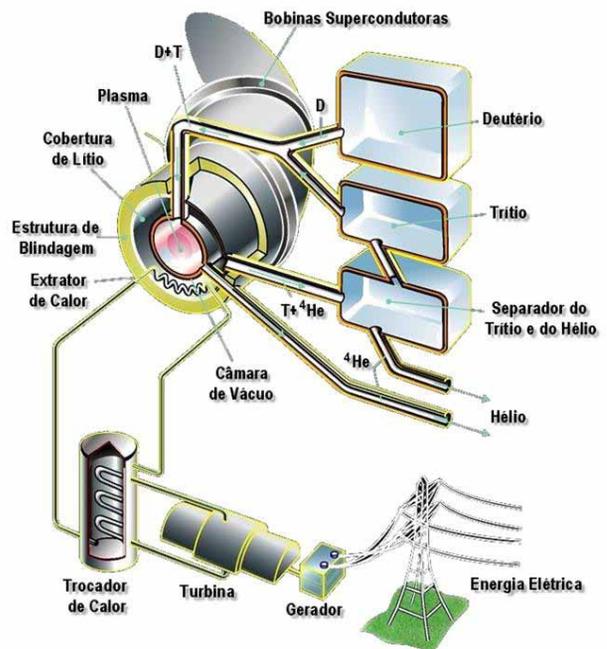


Fig. 4 – Funcionamento de uma central a fusão termonuclear controlada. fonte: [6] e [7].

Observa-se na **figura 4** a operação de um reator a fusão nuclear com interação do tipo D-T, no qual é extraído do cobertor de Lítio, além do calor armazenado, a produção de Trítio que fará parte do combustível utilizado para o processo de fusão nuclear. Veja que também é extraído do reator todo o hélio produzido durante o processo da fusão nuclear do D-T.

Uma vez cessada a operação de disparo do reator a fusão nuclear, a coluna de plasma toroidal, no interior da câmara de vácuo, responsável por fornecer o ambiente para ocorrer a fusão nuclear se apaga. Com a extinção do plasma todo o processo é interrompido, e resta apenas o calor gerado da reação nuclear contido no cobertor de Lítio envolto da câmara de vácuo da máquina [5] e [20].

Na **figura 4**, é possível observar uma câmara chamada de blindagem. Esta blindagem é necessária para conter os nêutrons de alta energia que eventualmente possam atravessar o cobertor de Lítio. Uma complexa sala de controle será necessária para a

utilização desta máquina.

Diferentemente de um reator a fissão, o reator a fusão necessita de inúmeros subsistemas para operar. Sua complexa tecnologia, faz desta máquina uma das mais complicadas inventadas pelo homem. O local destinado a um reator desse tipo, vai necessitar de um grande complexo de edificações para seu funcionamento. A qualidade do plasma será fundamental para que a máquina seja eficiente. Desta forma, uma grande quantidade de diagnósticos do plasma será necessário, similar ao que se tem hoje nos laboratórios de pesquisa de fusão [6].

A máquina destinada a ser o reator propriamente dito, apesar de grande, ficará escondida por diversos subsistemas interligados a ela, além é claro, de uma grande quantidade de circuitos elétricos e bobinas magnéticas necessárias para gerar os campos magnéticos para o confinamento do plasma para a fusão.

6.2 Comparativo da eficiência de energia elétrica gerada

Apesar dos vários protestos realizados contra novas centrais de energia elétrica, seja ela qual for, vir de uma sociedade que faz uso constante e sistemático de telefones móveis, redes sociais, computadores, internet e outras inúmeras máquinas elétricas, a necessidade de energia elétrica, mesmo para essas pessoas críticas, é considerada uma prioridade para a espécie humana [5] e [19].

De fato somos seres consumidores vorazes de energia elétrica [3]. Durante as últimas décadas a humanidade tem desenvolvido tecnologias que permitem transformar outras fontes energia em energia elétrica. As chamadas fontes renováveis modernas, todas possuem a promessa de que no futuro possam ser eficientes e importantes.

O emprego de novas fontes de energia elétricas, como a dos sistemas fotovoltaicos, possibilitam gerar eletricidade em residências, comércio e empresas. Além de reduzir a necessidade de grandes centrais interligadas a matriz energética de um país, possibilita algo que é de extrema importância para a geração de

energia elétrica mundial, que é a diversidade de fontes e a difusão capilar de minicentrals distribuídas [8].

Infelizmente estas fontes de energia renováveis tradicionais são limitadas ao “humor” da natureza deste planeta. Isto porque, os ventos, a água, a iluminação solar, todos dependem do clima. A energia nuclear é imune ao clima normal (não considerando os acidentes naturais catastróficos).

A obtenção de energia elétrica de forma contínua e não intermitente, faz do emprego de energia núcleo-elétrica, a opção mais robusta e eficiente [5] e [8]. A energia nuclear é sem dúvida a fonte de energia mais eficiente disponível para a humanidade. Veja a **figura 5**, com uma comparação entre as eficiências das fontes de energia para a produção de 1GW elétrico.



Fig. 5 – Comparativo das eficiências dos combustíveis utilizados para gerar eletricidade. Fonte: [6] e [7].

Observe na **figura 5**, a diferença da quantidade de combustível para produzir 1GW (1×10^9 Watt) de energia elétrica com Fusão Nuclear (500 quilos) e o com o Carvão (~2 milhões de toneladas). Isto sem contabilizar a quantidade de dióxido de carbono liberado na atmosfera durante a queima de todo este volume de carvão em uma central termelétrica.

7. O futuro da energia elétrica por fusão nuclear

Gerar energia elétrica parece que será sempre algo importante para o futuro da humanidade. Além disto, será necessário fazê-la de forma sustentável e eficiente, para que possa ser solução e não um novo problema.

Novas fontes de energia, como solar, eólica,

hídrica, energia das marés e energia geotérmica serão uma importante contribuição [2]. Entretanto, é um fato inegável que estas novas fontes de energias serão fundamentais e tão somente apenas a uma parcela auxiliar de energia elétrica necessária, não podendo vir a substituir os combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural).

No entanto, uma central nuclear baseada na reação de fissão gera resíduos radioativos que são difíceis de armazenar; e ainda depende de reservas de urânio que demandam enriquecimento para serem utilizados nos reatores [42] e [43]. Além disso é clara a dificuldade de mineração e refino da matéria-prima [7] e [25].

Resta a maior esperança do mundo com a fusão termonuclear controlada. Com reservas praticamente inesgotáveis e enorme eficiência energética, quando forem finalmente estabelecidos os parâmetros necessários para a fusão nuclear na Terra, a humanidade passará a uma nova fase de desenvolvimento sem precedentes devido a abundância de disponibilidade de eletricidade.

Desde a década de 1950, a energia nuclear [25] tem estado na arena energética mundial e tem se mostrado promissora. Com o pouco combustível consumido, pode-se obter enormes quantidades de energia com o processo de fusão nuclear, conforme pode ser visto na **figura 5**, mostrando o comparativo das eficiências dos combustíveis utilizados para gerar eletricidade.

Em 2016 o Tokamak dos EUA, *Alcatel C-Mod do MIT (Massachusetts Institute of Technology - www.mit.edu)* produziu um recorde mundial com a pressão do plasma no dispositivo que atingiu 2,05 atmosferas, com uma temperatura correspondente de 35 milhões de graus Celsius, cerca de duas vezes a temperatura do núcleo do Sol.

No ano de 2017, um Tokamak Chinês chamado EAST (*Experimental Advanced Superconducting Tokamak - Tokamak Experimento Avançado Supercondutor*) do Instituto de Pesquisa de Hefei (Hefei - english.ipp.cas.cn), conseguiu manter uma coluna de plasma em um confinamento de alta energia por 101,2 (cento e um vírgula dois) segundos no dia 03 de julho de 2017. Feito muito importante para conseguir a fusão nuclear, atendendo uma parte das três condições de simultaneidade ao longo do tempo de confinamento. Havendo, nesse caso,

necessidade de superação da densidade da temperatura.

A máquina Chinesa novamente se mostrou um excelente experimento de fusão termonuclear controlada. Em 13 de novembro deste ano de 2018, o EAST [44] conseguiu uma proeza, atendendo mais um dos requisitos das três condições de simultaneidade, agora a temperatura. Nesse dia, o Tokamak EAST conseguiu exceder os 100 milhões de graus Celsius durante o tempo de confinamento de 101,9 segundos, cerca de sete vezes a temperatura do Sol, que é de aproximadamente 15 milhões de graus Celsius. No exemplo foi atendido o requisito de temperatura esperado para se obter um reator a fusão.

Dessa forma, ficou pendente nesse projeto apenas o aumento da densidade do plasma. Atualmente o EAST tem se dedicado a esse desafio para que se consiga realizar o teste definitivo, utilizando ao mesmo tempo os três parâmetros de simultaneidade. Se a máquina for capaz disso, ela será a primeira a atingir o *Break Even Point*, antes mesmo do ITER. A nação Chinesa poderá ficar com o recorde de conseguir atingir individualmente e em conjunto as três condições de simultaneidade para a fusão nuclear. Se isto ocorrer, a China também, obterá o primeiro *Break Even Point* em um Tokamak. Sendo o primeiro país a ter um reator termonuclear controlado do tipo Tokamak.

Os EUA apostam que seus experimentos com Confinamento Inercial com Micro Implosões de Pellets a Laser consigam obter um resultado satisfatório para prosseguir nas investigações científicas e quem sabe se tornar um produto comercializável. A Alemanha conduz também, seus próprios experimentos voltados a máquinas do tipo *Stellarator* que utilizam campo magnético para funcionamento contínuo, e que tem progredido em seus resultados. Sua principal máquina é a W7-X (Wendelstein 7-X - www.ipp.mpg.de/w7x), no Instituto de Física de Plasma Max Planck (IPP). A Rússia e Europa estão juntas no consórcio ITER, tendo que dividir a tecnologia com a própria China, EUA, Índia, Japão, Coreia do Sul, entre outros países com menor participação.

A constante, mas lenta evolução das máquinas do tipo Tokamak para a obtenção de um reator a fusão, envolve muitos países. Desde seu surgimento na antiga União Soviética, os experimentos têm sido conduzidos

em muitos laboratórios pelo mundo, em sua grande maioria com máquinas pequenas e médias. Os resultados com máquinas pequenas propiciaram muitos avanços tecnológicos em diagnósticos de plasma e sistemas de apoio importantes, tais como: controle operacional, controle de posição do plasma, circuitos elétricos e eletrônicos, construção e testes de bobinas supercondutoras. Dessa forma tem sido desenvolvido todo um conhecimento inédito na área de engenharia de fusão termonuclear controlada [26].

Entretanto, sabe-se que para obter a fusão nuclear é preciso construir máquinas grandes, tanto pelo volume do plasma quanto pela superfície da coluna de plasma toroidal. Por isso, vários países construíram com financiamento próprio durante ao longo das décadas diversas máquinas grandes do tipo Tokamak. Dentre estas máquinas grandes destacam-se quatro: Tore Supra (Centro de Pesquisas Nucleares em Cadarache) Francês, TFTR (*Tokamak Fusion Test Reactor* - PPPL – Laboratório de Física de Plasmas em Princeton) dos EUA, JT-60U (Japan Torus – JAERI – Instituto de Pesquisa em Energia Atômica do Japão) Japonês e o JET (*Joint European Torus* – Centro de Energia de Fusão em *Culham*) no Reino Unido.

Na **figura 6**, é possível observar os parâmetros de volume de plasma, quantidade de energia gerada por fusão nuclear, ano de operação e país financiador. A **figura 6** mostra a evolução do tamanho do plasma e a energia térmica gerada por fusão nuclear, ou esperada para os dispositivos que ainda não estão operacionais, como o ITER e o DEMO.



Fig. 6 – Evolução dos dispositivos Tokamaks para reatores a fusão. Fonte: [8].

Os pesquisadores de fusão nuclear aguardam ansiosos os resultados que são esperados para os próximos anos, pois finalmente a tecnologia evoluiu o suficiente para ajudar nas pesquisas científicas de fusão nuclear,

permitindo avanços significativos obtidos nesses últimos 20 anos, que superam todos os alcançados nos últimos 70 anos. A iniciativa de construção do ITER tem sido uma promessa e um grande incentivo para a comunidade científica [29]. A possibilidade de gerar energia elétrica com a abundância sempre esperada, com um reator seguro e eficiente, será sem dúvida uma das maiores conquistas humanas.

Isso abrirá novas perspectivas para a humanidade, tanto no seu desenvolvimento socioeconômico, modificando a forma como produzimos bens de consumo, quanto ao valor agregado da energia para a fabricação de produtos e serviços. Outra mudança radical será presenciada na mobilidade urbana de uma forma jamais vista. A possibilidade de utilizar todos os veículos movidos a energia elétrica permitirá grandes deslocamentos a custos irrisórios. Permitindo inclusive explorar os oceanos como nunca foi feito, e finalmente colonizar outros planetas no espaço. Durante alguns anos após a construção e a operação de reatores a fusão nuclear, o custo da energia elétrica ainda será elevado, mas a tendência é de uma redução drástica no seu valor devido a grande oferta de energia elétrica [7].

8. Discussão e conclusão

No presente artigo foi apresentado o panorama atual da energia de fusão termonuclear no mundo, perspectivas, tecnologias, os atuais desenvolvimentos e resultados de experimentos científicos para a fusão nuclear e as expectativas quanto aos testes futuros das novas máquinas de investigação científicas pelo mundo.

É certo que esta tecnologia é hoje um trunfo da humanidade, mas para ser efetiva, ainda existe um longo caminho a ser percorrido pelos governos, agências, engenheiros e pesquisadores.

São dois os caminhos vislumbrados: o caminho da tecnologia, que permitirá aproveitar ao máximo os benefícios de se utilizar a energia nuclear para obter a energia elétrica, e o caminho da responsabilidade, com o compromisso de fazê-lo de forma coerente, segura e normatizada, com o apoio de políticas de segurança mundial e fiscalização comprometida

com a segurança nas fases de desenvolvimento, projeto e construção das novas centrais eletro nucleares.

Acredita-se que no futuro próximo as centrais de Fusão Termonucleares Controladas sejam uma

realidade corriqueira, elevando a qualidade de vida da raça humana, e ampliando em muito nosso conhecimento, permitindo a exploração efetiva no universo possibilitando levar os seres humanos para morar em outros planetas e no fundo dos oceanos.

Referências Bibliográficas

- [1] K. R. Smith et al., Energy and Human Health, Annu. Rev. Public Health 2013. v.34:159–88, 2013.
- [2] E. Polymeneas, H. Tai, A. Wagn, Less Carbon Means More Flexibility: Recognizing The Rise of New Resources in The Electricity Mix, McKinsey & Company, 2018.
- [3] C. Tryggestad, et al., Global Energy Perspective 2019: Reference Case (January), Energy Insights McKinsey, 2019.
- [4] R. Biasi, A Energia Nuclear no Brasil, Biblioteca do Exército – Editora, Rio de Janeiro, 1979.
- [5] F. Wiltgen, (L.F.W. Barbosa), Sistema Elétrico Pulsado com Controle Digital do Tokamak ETE (Experimento Tokamak Esférico), Dissertação de Mestrado, ITA, 1998.
- [6] F. Wiltgen, (L.F.W. Barbosa), Desenvolvimento de um Sistema Inteligente em Tempo Real para Controlar o Deslocamento do Plasma no tokamak ETE (Experimento Tokamak Esférico), Tese de Doutorado, ITA, 2003.
- [7] F. Wiltgen, Sistemas Inteligentes para o Controle de Plasma em Máquinas do Tipo Tokamak – Aplicação de Sistemas de Controle com Inteligência Artificial, Novas Edições Acadêmicas, 2018.
- [8] F. Wiltgen, Energia Eletronuclear: Fusão e Fissão, Seminário apresentado na Semana de Engenharia Elétrica da Universidade de Taubaté no dia 18 de setembro, 2017.
- [9] F. Wiltgen, Energia Nuclear Produzindo Eletricidade, Seminário apresentado no VII CICTED - Congresso Internacional de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento da Universidade de Taubaté no dia 19 de setembro, 2018.
- [10] F. Wiltgen, Energia Elétrica do Futuro, Seminário apresentado no VIII CICTED Congresso Internacional de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento da Universidade de Taubaté no dia 23 de outubro, 2019.
- [11] S. T. Brewer, 40th Anniversary The First Reactor, U.S. Department of Energy (DOE/NE-0046), 1982.
- [12] V. C. Jones, Manhattan: The Army and The Atomic Bomb, Center of Militar History United States Army Washington, D.C, 1985.
- [13] F. G. Gosling, The Manhattan Project: Making The Atomic Bomb, U. S. Department of Energy (DOE/MA-0001-01/99), 1999.
- [14] J. Lovelock, Gaia - Cura Para Um Planeta Doente, Ed. Cultrix, 2006.
- [15] E. Teller, Fusion Magnétic Confinement, Academic Press, New York, 1981.
- [16] L. A. Artisimovich, Tokamak Devices, Nuclear Fusion, 12: 215-252, 1972.
- [17] F. I. Boyle, Plasmas en el Laboratorio y en el Cosmos, México, Reverté Mexicana, 1968.
- [18] F. F. Chen, Plasma Physics and Controlled Fusion, Plenum Press, New York, 1974.
- [19] R. W. Conn, The Engineering of Magnetic Fusion Reactors, Scientific American, 249(4), 1983.
- [20] J. Wesson, Tokamaks, Oxford, Clarendon Press, 1987.
- [21] Y. Eliezer, S. Eliezer, The Fourth State of Matter - an Introduction to the Physics of Plasma, Bristol and Philadelphia, Adam Hilger, 1989.
- [22] R. Herman, Fusion - The Search for Endless Energy, University Cambridge, USA, 1990.
- [23] F. Wiltgen (L.F.W. Barbosa), Relatório de Atividades da Área de Engenharia Elétrica e Eletrônica do Tokamak ETE (Experimento Tokamak Esférico), São José dos Campos, Inpe, 1996. (INPE - 5994 – PRP/195)
- [24] F. Wiltgen (L.F.W. Barbosa), et al. Sistema Elétrico Pulsado com Controle Digital do Tokamak ETE (Experimento Tokamak Esférico) Primeiro Relatório, São José dos Campos, Inpe, 1997. (INPE - 6137 – PRP/200)
- [25] L. A. A. Terremoto, Apostila de Pós-Graduação Disciplina TNR5764 – Fundamentos de Tecnologia Nuclear Reatores, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), 2004.
- [26] F. Wiltgen (L.F.W. Barbosa), et al. Pulsed electric system for production and confinement of plasma in ETE (Spherical Experiment Tokamak), 13th IEEE International Pulse Power Conference - PPC and 28th IEEE In-

- ternational Conference on Plasma Science - ICOPS, Las Vegas, USA, 17-22, June, 2001.
- [27] G. O. Ludwig, Anteprojeto de Engenharia do Tokamak ETE, São José dos Campos, Inpe, 1993. (Inpe - 5529 - PRE/1796)
- [28] A. C. L.Chian et al., Programa Nacional de Física de Plasmas e Fusão Termonuclear Controlada, Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Física, São Paulo, 1979.
- [29] J. Pámela, CHATELIER, M., Des Premiers Tokamaks au Projet ITER, La Recherche, 299: 61-66, 1997.
- [30] H. P. Furth, Tokamak Research, Nuclear Fusion 15: 487-534, 1975.
- [31] GA - Technologies - Fusion Power Research - Annual Report, California, 1990.
- [32] C. D. Beidler et al., Stellarator Fusion Reactors – An Overview, Toki Conf. ITC12, Dec., 2001.
- [33] A. H. Boozer, What is a Stellarator?, Physics of Plasmas, 5 (5): 1647-1655 , 1998.
- [34] L. H. Gresh, Inertial Confinement Fusion: An Introduction the Energy of the Stars, The University of Rochester Laboratory for Laser Energetics, NY 14623-1299, (585) 275-5101, 2009.
- [35] P. B. Radha et al., Inertial Confinement Fusion Using the OMEGA Laser System, IEEE Transactions on Plasma Science, v. 39(04), 2011.
- [36] J. Badziak, Laser Nuclear Fusion: Current Status, Challenges and Prospect, Bulletin of The Polish Academy of Sciences Technical Sciences, v. 60, n. 4, 2012.
- [37] W. Goldestein, R. Rosner, Lawrence Livermore National Laboratory, Workshop on the Science of Fusion Ignition on NIF, May 22-24, 2012.
- [38] E. I. Moses, Ignition and Inertial Confinement Fusion at The National Ignition Facility, Journal of Physics: Conference Series, 2010.
- [39] F. Wiltgen (L.F.W. Barbosa), Nascimento JR, C. L., Ludwig, G. O., Estudo de um Controlador Neural para o Experimento de Fusão Termonuclear Controlada - Tokamak – ETE, Congresso Brasileiro de Automática - XV CBA, Gramado, 2004.
- [40] G. O. Ludwig, Relatório de atividades de 2002 da linha de pesquisa e desenvolvimento em fusão termonuclear controlada – Fusão, do Laboratório Associado de Plasma – LAP, São José dos Campos, Inpe, 2003. (INPE-9613-NTC/353)
- [41] R. M. O. Pauletti, Projeto Estrutural de Reatores à Fusão - Passado, Presente e Futuro (Tese de Doutorado) - Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1994.
- [42] IAEA, Nuclear Power Reactors in the World – Edition 2017, Viena, 2017. (IAEA-RDS-2/37)
- [43] R. L. Murray, Nuclear Energy, Pergamon Press, Oxford, 1993.
- [44] Y. Wan, Road Map of Chinese Fusion Research and the First Chinese Fusion Reactor - CFETR, Germany, 531st Wilhelm and Else Heraeus Seminar on 3D versus 2D in Hot Plasmas, 30th April – 2nd May Physikzentrum Bad Honnef, 2013.

Biblioteca do Exército

Tradição e qualidade em publicações

A Biblioteca do Exército (BIBLIEx) – Casa do Barão de Loreto é uma centenária instituição cultural do Exército Brasileiro que contribui para o provimento, a edição e a difusão de meios bibliográficos necessários ao desenvolvimento e aperfeiçoamento da cultura profissional-militar e geral.

**SEJA NOSSO
ASSINANTE**

e receba em sua residência
nossos livros publicados.



Tel.: (21) 2519-5707

Praça Duque de Caxias, nº 25
Palácio Duque de Caxias
Ala Marcílio Dias – 3º Andar
Centro – CEP 20.221-260
Rio de Janeiro – RJ



Acesse:

www.bibliex.eb.mil.br

