



ENERGIA ELETRONUCLEAR: FUSÃO NUCLEAR & FISSÃO NUCLEAR

Filipe Wiltgen | lfwbarbosa@gmail.com | FATEC

RESUMO

Em um mundo que precisa de muita energia elétrica, e a grande maioria de nossas fontes de energia são pouco eficientes e escassas, muitas vezes dependentes do “humor” da natureza. A tecnologia eletrônica nascida nas décadas de 30 e 40, é independente do clima, eficiente e abundante. Como tudo na natureza possui vantagens e desvantagens, a raça humana tem lidado com isso e amadurecido com a tecnologia. Fato é que a cada dia a energia eletrônica parece ser uma das poucas alternativas viáveis para manter a vida humana no futuro. Este artigo discute a história, o uso, as tecnologias, as dificuldades científicas, além dos benefícios e cuidados necessários para a utilização consciente desta tecnologia nuclear.

Palavras chave: Energia, Eletricidade, Eletrônica, Reatores Nucleares, Fusão Nuclear, Fissão Nuclear, Tecnologia, Tokamak, ITER.

ABSTRACT

In a world that needs a lot of electricity, vast majority of our energy sources are inefficient and scarce, often dependent on "mood" of nature. Electronuclear technology born in 30s and 40s, is climate independent, efficient and abundant. As everything in nature has advantages and disadvantages, the human race has dealt with it and matured with technology. The fact is that every day nuclear energy seems to be one of few viable alternatives to maintain human life in the future. This article discusses history, use, technologies, scientific difficulties, and benefits and care needed for the conscious use of this nuclear technology.

Keywords: Energy, Electricity, Electronuclear, Nuclear Reactors, Nuclear Fusion, Nuclear Fission, Technology, Tokamak, ITER.

1. INTRODUÇÃO

Em um mundo no qual os recursos naturais parecem estar se exaurindo mais rápido do que o esperado, e a necessidade de energia elétrica cada vez mais entrelaçada com o futuro do desenvolvimento humano, a alternativa eletronuclear nunca foi tão premente.

A pouca eficiência na conversão útil de energia elétrica obtida das fontes renováveis, somado a gradativa diminuição do uso, exploração e reservas de combustíveis fósseis, põe em destaque as pesquisas tecnológicas de reatores nucleares, quer sejam com os processos de fissão nuclear, ou através dos futuros reatores a fusão nuclear.

As primeiras pesquisas envolvendo energia nuclear que foram amplamente divulgadas ao público em geral foram relacionadas a dispositivos bélicos de destruição em massa. 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, parecem estar presentes mesmo 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 (BIASI 1979, WILTGEN 1998 e WILTGEN 2003).

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. 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 utilizados como neste período histórico do que em qualquer outro na recente história da humanidade.

A relação dos seres humanos e da eletricidade é tão amplamente entrelaçado que os registros dos menores níveis de mortalidade infantil, assim como, maior longevidade e melhor educação, correspondem diretamente com os países mais desenvolvidos, e que disponibilizam, e consomem, cada vez mais energia elétrica por habitante.

O primeiro reator a fissão nuclear surgiu na *Universidade de Chicago*, pouco tempo depois do término da Segunda Guerra Mundial e com o fim do *Projeto Manhattan*, responsável por abrigar as 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 o EUA utilizar estas armas contra o Império Japonês.

O físico italiano *Enrico Fermi*, um dos pesquisadores envolvidos com o Projeto Manhattan, foi o responsável também, pelo desenvolvimento, construção e teste do primeiro Reator a Fissão Nuclear para conversão de energia nuclear em eletricidade na Universidade de Chicago (1942), o *Chicago Pile 1 (CP-1)*, conforme pode ser visto na Figura 1.

Figura 01 | Físico *Enrico Fermi* e o núcleo do primeiro Reator Fissão Nuclear *CP-1*



Fonte: WILTGEN (2017).

A opção nuclear não descarta de forma alguma a contribuição de todas as outras fontes de energia tradicionais.

Ao que tudo indica, a crise energética de eletricidade vai se agravar, e isto ocorrerá rápido, ainda nesta década.

A substituição dos combustíveis fósseis por eletricidade nos veículos, é de extrema importância, mas ela ajudará na crise energética mundial.

As fontes renováveis apesar de pouco eficientes, serão também muito úteis e necessárias. Entretanto, deve-se ter a consciência de que qualquer uma destas fontes atuais, 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*, *James Lovelock*.

Que em seus estudos observou a necessidade de desenvolver as tecnologias para o uso seguro da energia eletronuclear como a principal opção energética mundial.

Atualmente as novas gerações de reatores a fissão permitem minimizar os erros humanos e mecânicos, apesar dos 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 eletronuclear intrinsecamente segura, abundante e muito eficiente.

1.1. OBJETIVO

A partir de agora, este artigo apresentará de forma objetiva e sintética as reações de fusão e fissão nucleares, 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. PROCESSOS NUCLEARES DE FUSÃO E FISSÃO

Dentre os processos físicos nucleares utilizados pela própria natureza para transformar energia, a fissão e a fusão nuclear são os com maior eficiência (WILTGEN 2008). Dentre os dois processos o mais comum no cosmos é o de fusão nuclear, que é o processo escolhido 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 obtida, enquanto que o processo de fissão nuclear é bem mais fácil de ser obtido (WILTGEN 1998).

2.1. REAÇÃO DE FISSÃO NUCLEAR

A reação de fissão nuclear, apesar de suas dificuldades tecnológicas, para ocorrer é mais simples de ser obtida do que a reação de fusão nuclear no planeta Terra. Também é verdade que a quantidade de energia obtida é bem inferior na reação de fissão nuclear do que na reação de fusão nuclear, por isso se diz que: *“nada é de graça na natureza”*.

O processo de fissionar um átomo é na verdade uma quebra da estrutura molecular de um átomo instável e com grande quantidade de prótons (92) e nêutrons (143) (Urânio (U-235)), que tem como subprodutos, partículas de alta energia (nêutrons) desprendidas, emissão de radiação gama (γ), a transformação de massa do átomo original em energia, e a formação de dois novos átomos (Bário (Ba) e Criptônio (Kr)) com massas inferiores a massa do átomo fissionado (TERREMOTO 2004). Na Figura 2 é possível ver a quebra de um átomo.

Para quebrar o átomo de Urânio, utiliza-se o disparo de um nêutron de alta energia. Se neste processo de fissão nuclear, existir outros átomos instáveis do mesmo tipo nas proximidades, tendo em vista que uma quebra do átomo emite até três nêutrons de alta energia, cada um destes nêutrons será capaz de fissionar mais um átomo e gerar mais três nêutrons de energia, e assim por diante, permitindo ocorrer o fenômeno conhecido como reação em cadeia.

A reação em cadeia descontrolada leva a uma grande explosão nuclear como as armas chamadas de bombas atômicas, mas a reação em cadeia controlada permite extinguir a reação após o fissionamento de uma certa quantidade de átomos sem que eles explodam descontroladamente através da absorção dos nêutrons energéticos em barras de controle no núcleo do reator.

Neste processo controlado (WILTGEN 2018) é possível esquentar muito o núcleo do reator com a reação nuclear, e depois resfriá-lo utilizando circulação de um fluido que rouba o calor e o transfere para outros circuitos trocadores de calor. Com a transferência deste calor é possível produzir vapor para acionar uma turbina e gerar eletricidade. É por isto que se diz que: *“um reator nuclear só serve para esquentar água e virar vapor, muito vapor!”*.

Figura 02 | Reação de Fissão Nuclear - Átomos Pesados geram Átomos mais Leves



Fonte: WILTGEN (2018 Seminário).

Dentro do núcleo de um reator a fissão nuclear, existem inserções para vários tipos de barras que permitem seu funcionamento seguro. Basicamente tem-se: barras de controle absorvedoras de nêutrons e barras de combustível nuclear radioativo, ambas imersas em um fluido moderador, capaz de dificultar a passagem de nêutrons e permitir o funcionamento do reator.

Desta forma, a reação de fissão nuclear permite que um reator possa operar gerando eletricidade a partir de uma fonte nuclear, por isso é chamada de energia eletronuclear ou nucleoeleétrica, neste artigo será utilizado a designação eletronuclear.

2.2. REAÇÃO DE FUSÃO NUCLEAR

Diferente da fissão nuclear, na fusão, 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 (TELLER 1981).

Aparentemente os maiores empecilhos estão relacionados 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). Isto 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 (ARTISIMOVICH 1972, BOYLE 1968, CHEN 1974 e CONN 1983).

Para romper a barreira eletrostática, os átomos devem estar com um alto grau de agitação térmica, o aumento da vibração dos átomos dissociados em elétrons e íons permite a grande movimentação cinética, o que só pode ser obtida com as elevadas temperaturas.

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 ocorram. Isto é conhecido como as três condições de simultaneidade para a obtenção da fusão nuclear (temperatura, densidade e tempo de confinamento).

A esta temperatura, o estado físico da matéria é o plasma (4º estado físico da matéria, que são cinco), e nenhum material na Terra pode entrar em contato físico direto com este estado de alta temperatura (ELIEZER 1989, HERMAN 1990 e CHEN 1974). A forma de manter o confinamento deste ambiente de alta temperatura e no estado físico de plasma, é obtido através da aplicação de

intensos campos magnéticos, ou com micro-implosões de *pellets* com laser.

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* de cada um dos átomos ionizados (dissociados em elétrons e íons) e fundir 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. Conforme pode ser observado na Figura 3, com o processo de fusão nuclear (WILTGEN 1996, 1997 e 1998).

Em um reator a fusão nuclear o processo deverá ser similar ao do 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 vapor que vai acionar uma turbina com gerador elétrico e produzir eletricidade.

Figura 03 – Reação de Fusão Nuclear - Átomos Leves geram Átomos mais Pesados



Fonte: WILTGEN (2018 Seminário).

Desta 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 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.

3. REATORES E DISPOSITIVOS DE INVESTIGAÇÃO CIENTÍFICA

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 tecnológico permite seu uso contínuo, prolongado e frequente. Em geral são equipamentos e máquinas que possuem elevado nível de TRL (TRL 9 - *Technology Readiness Levels*).

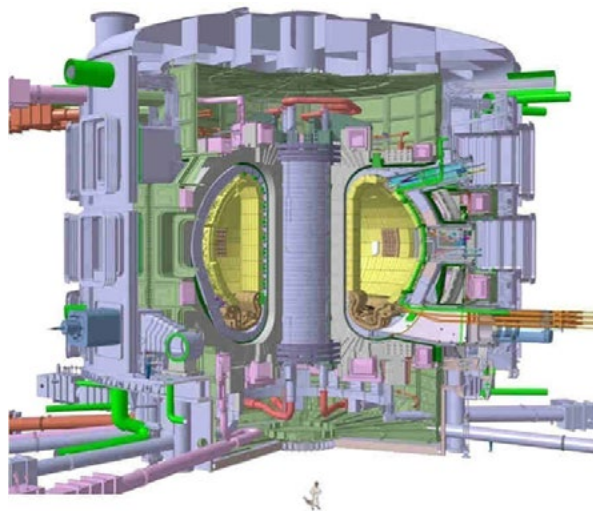
No processo de fissão nuclear, os dispositivos de conversão de energia nuclear em elétrica, foram exaustivamente testados, existem muitos modelos e muitas técnicas diferentes de extrair o calor do núcleo do reator, mesmo o reator possui inúmeros projetos diferentes conforme a empresa que os fabrica comercialmente.

Com o tempo, muitas diretrizes e normas internacionais foram elaboradas para que estes equipamentos possam ser seguros na operação e no descarte de resíduos. 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 (WILTGEN 2001, 2003, LUDWIG 1993 e CHIAN 1979). 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 ponto de virada dos experimentos a fusão nuclear, abrindo o caminho para a construção do primeiro reator a fusão nuclear (DEMO) em 2020. O ITER (PÁMELA 1997) é um consórcio de múltiplos países que trabalham 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 4, é possível ver uma ilustração de como será o Tokamak ITER quando estiver pronto.

Figura 04 | Tokamak ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*)



Fonte: WILTGEN (2003).

3.1. REATORES A FISSÃO NUCLEAR

Existem em operação no mundo cerca de ~450 (448 unid.) reatores nucleares a fissão de diversos modelos tecnológicos diferentes (IAEA 2017). Dentre estes diversos tipos de reatores, os modelos PWR (*Pressurized Water Reactor* - Reatores a Água Pressurizada) são os mais populares, e tem se mostrado seguros ao longo destes anos de operação. Estes são o mesmo tipo de reator utilizado nas centrais nucleares de Angra no Brasil (TERREMOTO 2004).

Os PWR estão na terceira geração de evolução tecnológica. Segundo a IAEA no relatório RDS 2-37 em 2016, existem 289 (duzentos e oitenta e nove) unidades dos reatores do tipo PWR em operação no mundo gerando ~272 GW_e. Observa-se que dois terços ($\frac{2}{3}$) dos reatores no mundo são do tipo PWR.

Os outros modelos existentes de reatores a fissão nuclear (MURRAY 1993 e TERREMOTO 2004) em operação no mundo são: BWR (*Boiling Water Reactor* - Reator a Água Fervente - 78 unid.), PHWR (*Pressurized Heavy-Water Reactor* - Reator de Água Pesada Pressurizada - 49 unid.), LWGR (*Light Water Graphite Reactor* - Reator de Grafite de Água Leve - 15 unid.), GCR (*Gas Cooled Reactor* - Reator Refrigerado a Gás - 14 unid.) e o FBR (*Fast Breeder Reactor* - Reator Regenerador - 3 unid.).

Apesar de existirem outros modelos de reatores a fissão nuclear, estes ainda não estão em uso, ou então foram descontinuados como os reatores RBMK (*Reaktor Bolshoy Moshchnosty Kanalnyy* - Reator a Água Fervente de Canais Pressurizados) que causaram o acidente nuclear de Chernobyl.

Fato é que a quarta geração de reatores a fissão nuclear a serem desenvolvidos devem ser mais eficientes, reduzindo o consumo de material radioativo, aumentando a segurança e a eficiência da troca de calor com o fluido de transporte. Dentre estes reatores modernos têm-se os *Térmicos* e os *Rápidos*.

Os *Térmicos* são: VHTR (*Very-High-Temperature Reactor* - Reator de Temperatura Muito Alta), MSR (*Molten-Salt Reactor* - Reator de Sal Fundido) e o SCWR (*Supercritical-Water-Cooled Reactor* - Reator Supercrítico a Água).

Os *Rápidos* são: GFR (*Gas-Cooled Fast Reactor* - Reator Rápido Refrigerado a Gás), SFR (*Sodium-Cooled Fast Reactor* - Reator Rápido Refrigerado a Sódio) e o LFR (*Lead-Cooled Fast Reactor* - Reator Rápido Refrigerado a Chumbo).

A diferença entre os reatores *Térmicos* e os *Rápidos* é que ao contrário do que ocorre em reatores *Térmicos*, os reatores *Rápidos* não possuem moderadores e utilizam combustível nuclear altamente enriquecido. O que eleva o custo operacional e aumenta a eficiência e a segurança operacional.

O núcleo de um reator *Rápido* é muito menor do que um núcleo de reator *Térmico* de mesma potência, entre 8 e 10 vezes menor. Assim sendo, o fluido refrigerante de um reator *Rápido* deve ser altamente eficiente em transferência de calor e não precisa ser pressurizado, o que aumenta a segurança do reator nuclear.

Espera-se que dentro da próxima década estas máquinas estarão em operação em centrais eletronucleares modernas propiciando maior robustez operacional.

3.2. DISPOSITIVOS DE INVESTIGAÇÃO CIENTÍFICAS DE FUSÃO NUCLEAR

Como se sabe, ainda não existem reatores a fusão nuclear. Isto porque para obter a fusão nuclear, como visto anteriormente, é muito difícil na Terra. Desta forma, todos os experimentos relativos a fusão nuclear, são de investigação científica. 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 fantástica eficiência na conversão de massa em energia calculada de uma reação termonuclear controlada.

Com o passar dos anos de pesquisas, algumas máquinas foram descontinuadas, assim como, algumas se mostraram muito promissoras no caminho à fusão nuclear. Atualmente, existem 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 da 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.

Utilizando esta técnica de confinamento dinâmico, usando campos magnéticos, existem dois dispositivos com diferentes princípios de funcionamento no foco das investigações, os *Tokamaks* e os *Stellarators*.

O 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 micro-implosão que comprimem o Deutério até que a pressão, a temperatura e a densidade sejam tais, que os átomos de Deutério dentro da microesfera possibilitam ocorrer a reação de fusão nuclear.

Utilizando esta 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*.

3.2.1. FUTUROS REATORES A FUSÃO NUCLEAR POR CONFINAMENTO DINÂMICO - CONHECIDO COMO CONFINAMENTO MAGNÉTICO DO PLASMA

O confinamento dinâmico para a fusão nuclear, nada mais é do que 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.

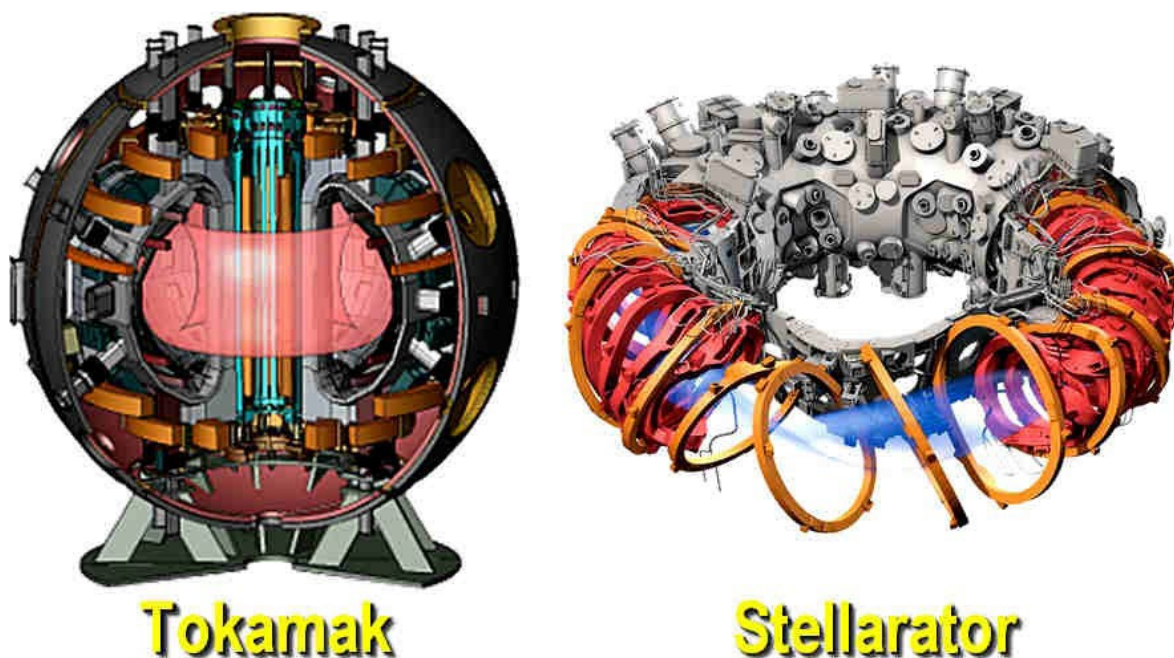
Dois dispositivos experimentais que fazem isso, são os *Tokamaks* e os *Stellarators*.

Os *Tokamaks* são dispositivos discretos (pulsados), ou seja, produzem uma coluna de plasma a cada disparo de fontes de energia sobre suas bobinas magnéticas, algumas bobinas servem para produzir o plasma e outras para confinara 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 5, a coluna de plasma dentro da câmara de vácuo do Tokamak (ARTISIMOVICH 1972, FURTH 1975, GA 1990, PÁMELA 1997 e WESSON 1987).

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 5 que cada bobina do Stellarator possui uma forma geométrica diferente da outra e assim, compondo um campo magnético estável que permite manter a coluna de plasma na região de interesse e durante bastante tempo (WILTGEN 2017 e 2018).

Figura 05 | Complexidade dos Dispositivos de Investigação Científica para Fusão Nuclear por Confinamento Magnético do Plasma



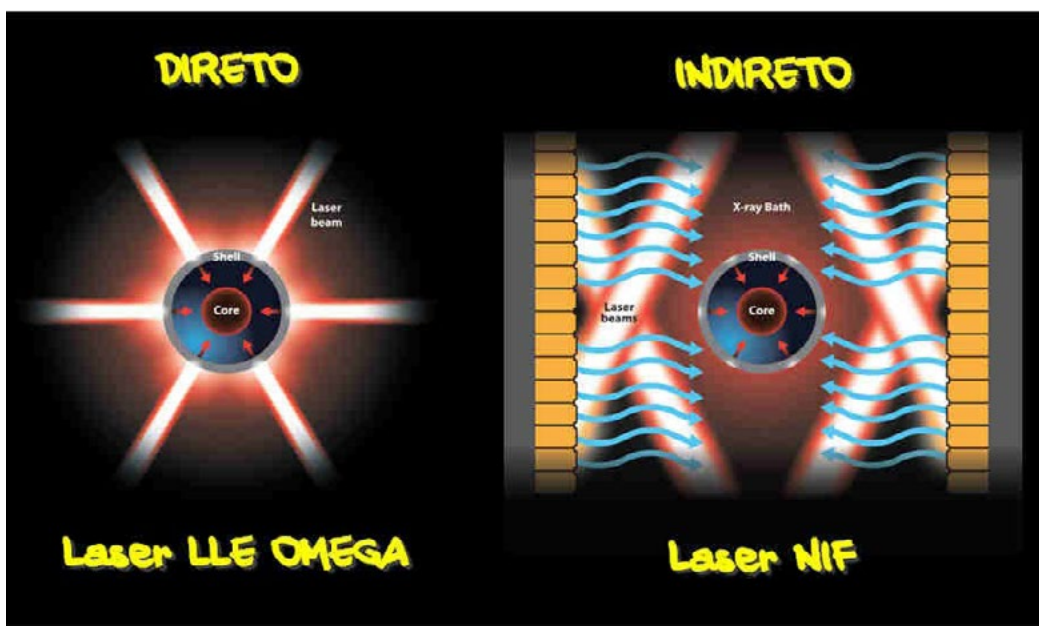
Fonte: WILTGEN (2017).

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 micro-implosão 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.

Existem dois experimentos nos EUA que utilizam a técnica de Confinamento Inercial, o *Laser LLE OMEGA* 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* que utiliza múltiplos feixes de laser disparados simultaneamente, mas de forma indireta possibilitando uma maior uniformidade na compressão esférica do *pellet* (microesfera) de Deutério. Na Figura 6 é possível observar uma ilustração dos dois processos de confinamento inercial a laser.

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

Figura 06 | Dispositivos de Investigação Científica para Fusão Nuclear por Confinamento Inercial a Micro-Implosões de Pellets a Laser



Fonte: WILTGEN (2018 Seminário).

3.3. PROCESSO FÍSICO DE CONVERSÃO ELETRONUCLEAR

A conversão eletronuclear 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.

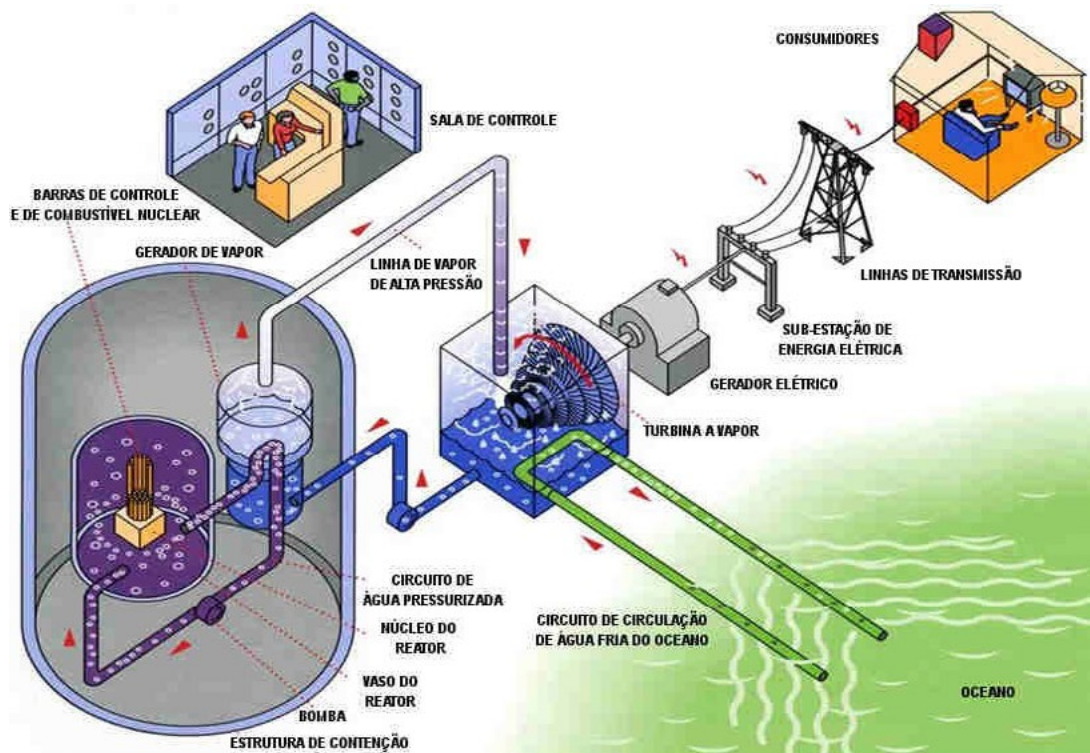
Nem todo o calor gerado no processo nuclear consegue ser extraído, parte é transferido para circuitos de refrigeração do núcleo do reator no caso da fissão nuclear. No caso da fusão nuclear, acredita-se que se a produção não for contínua, como é o caso das máquinas do tipo Tokamak. Neste dispositivo existirá uma camada da máquina que permanecerá aquecida durante um longo período (cobertor de Lítio), permitindo que os trocadores de calor possam ficar em funcionando transportando o calor por longos períodos, isso porquê não existe núcleo em um futuro reator a fusão.

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.

Na Figura 7 é possível observar de forma sintética todo o processo simplificado de uma central eletronuclear a fissão. Note que a sala de controle é um dos importantes itens deste sistema, assim como, o próprio reator nuclear.

O bom controle de uma central eletronuclear é de extrema importância para seu funcionamento. Nesta sala de controle é que decisões a respeito do aquecimento do núcleo e da eficiência da central são constantemente avaliados pelos operadores a fim de evitar algum tipo de incidente ou acidente operacional.

Figura 07 | Funcionamento de uma Central a Fissão Eletronuclear



Fonte: WILTGEN (2018 Seminário).

Veja na Figura 7, que o circuito de refrigeração do núcleo geralmente é um circuito fechado. Entretanto, existem circuitos de emergência que podem fazer fluir outros fluidos de refrigeração em caso de necessidade. Note também, que após a condensação do vapor na turbina, o fluido é refrigerado quase sempre pela circulação de um circuito com água do mar a baixa temperatura que rouba o calor, e permite que o fluido possa ser bombeado para um circuito trocador de calor, e ser novamente transformado em vapor, e assim sucessivamente.

Para reatores a fusão nuclear o processo tecnológico é um pouco mais complicado, devido a necessidade 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*). Sendo esta última, ainda mais difícil de ser obtida devido às altíssimas temperaturas necessárias, muito acima da interação D-T.

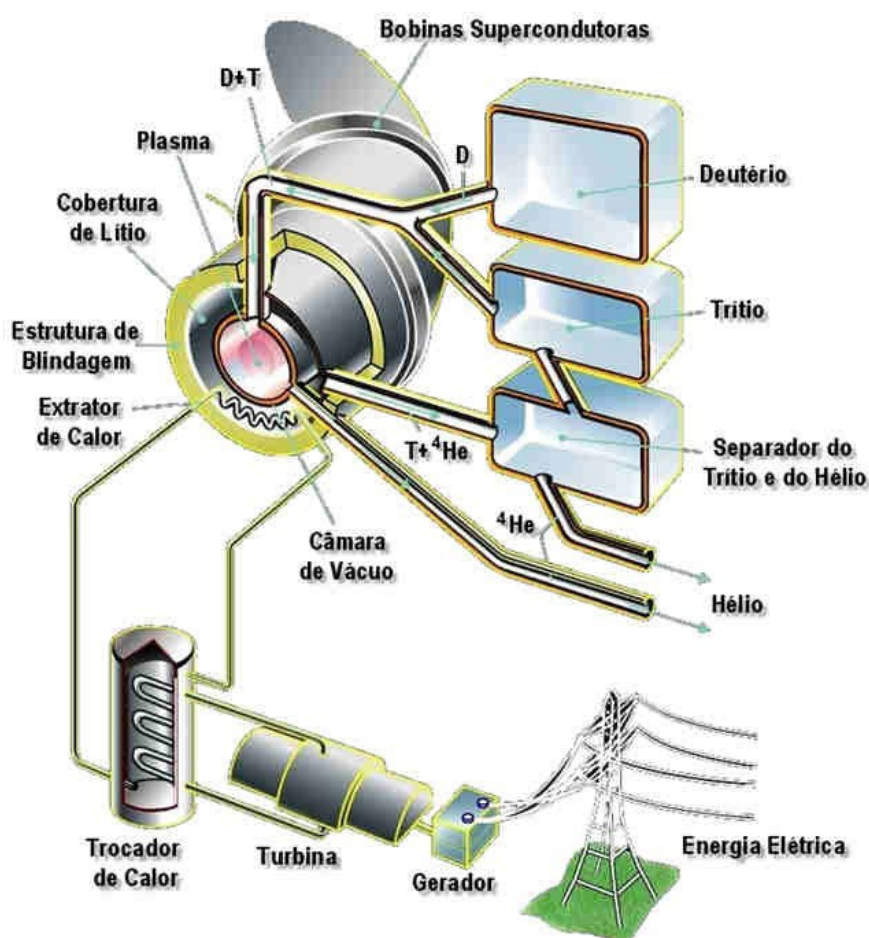
Em um futuro reator a fusão nuclear ao que tudo indica será baseado na tecnologia de Confinamento Magnético do Plasma em máquinas do tipo Tokamak. Durante os muitos anos de pesquisa científica neste tipo de máquina, um experimento do tipo Tokamak foi o primeiro a obter

fusão nuclear no planeta Terra (WILTGEN 1998, 2002 e 2018, PAULETTI 1994 e LUDWIG 1993 e 2003).

O experimento do Reino Unido 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 (2018) a maior quantidade de energia termonuclear produzida por fusão, acima de 16 MW_{th} (térmico) em 22 de setembro de 1997 (WILTGEN 1998).

Na Figura 8, observa-se uma das propostas para o arranjo esperado em um reator a fusão nuclear.

Figura 08 | Funcionamento de uma Central a Fusão Eletronuclear



Fonte: WILTGEN (2003).

Observa-se na Figura 8 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.

Na Figura 8, 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 como reator.

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 já 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 tem-se hoje nos laboratórios de pesquisa de fusão.

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.

3.4. DIFICULDADES TECNOLÓGICAS E CUIDADOS COM A ENERGIA NUCLEAR

Desde os primeiros incidentes rotineiros de laboratório até acidentes de grandes proporções, como das falhas em reatores a fissão nuclear, as dificuldades em organizar, planejar e executar contingências eficazes tem sido foco de todos aqueles que trabalham com energia nuclear.

A má fama dos reatores a fissão nuclear que no passado deram problemas, assim como, no recente acidente da central nuclear de Fukushima, que não estava preparada para um Tsunami devido falhas no projeto de engenharia. É por isto que a engenharia tem que estar muito atenta ao entorno das centrais pensando em como manter ativos e operantes todos os sistemas primordiais para garantir a segurança e integridade dos reatores.

O planejamento dos atributos de segurança baseado em engenharia de requisitos devem reger as normas e procedimentos necessários na construção e/ou adaptação de centrais nucleares e reatores

nucleares. Tão importante quanto proteger o núcleo de um reator a fissão é proteger seu sistema de salvaguardas. Isto não vinha sendo considerado primordial, como deveria, em projetos de engenharia nuclear no mundo.

A IAEA como o principal órgão internacional, parece que não atua da forma como deveria, se preocupando muito mais em fazer relatórios e verificar as armas nucleares, do que com o que realmente é importante que são as centrais nucleares. Todos sabem que os países militarmente atômicos não mostram, e não deixam saber o real poder do arsenal nuclear disponível.

O importante papel desta agência internacional deveria ser na promoção de um padrão internacional de engenharia de requisitos de segurança para centrais nucleares, que devem ser revisados a cada novo evento com a finalidade de minimizar riscos com acidentes nucleares.

Das diversas dificuldades tecnológicas que as centrais nucleares a fusão vão ter que enfrentar, a principal será relativo ao fornecimento de energia elétrica para a operação. É possível que uma tecnologia eficiente de armazenamento de energia seja necessária para que no futuro estas centrais de fusão nuclear possam racionalizar suas operações, concentrando todos recursos necessários e primordiais para operação dentro do próprio “*site*” que abriga o complexo nuclear de fusão.

Uma central nuclear deve ser vista como uma pequena cidade auto-sustentada, com a única finalidade de manter segura a operação nuclear. Prover todos os recursos necessários para operar durante um eventual acidente natural, mesmo que em estado de desligamento normal, deve existir um mapeamento da árvore de falhas, no qual cada um deve conter a estrutura de mitigação para a falha incluída nos requisitos principais de segurança.

Sabe-se que mesmo com o uso de centrais não-nucleares de geração e transmissão de energia elétrica, acidentes e riscos sempre estão presentes. Não é incomum um acidente com energia elétrica, quer seja, na própria operação com a fonte primária de conversão de energia, como na forma de transformar em energia elétrica para ser transmitida. E isto ocorre mesmo com sistemas mais simples e pouco complexos como centrais eólicas, centrais solares, centrais hidrelétricas e centrais termelétricas.

É preciso amadurecer os procedimentos de prevenção a acidentes nucleares, pois diferentemente de outros acidentes em centrais tradicionais de energia elétrica não-nucleares, a energia nuclear possui o elemento radioativo que pode aumentar em proporções globais o tamanho

do acidente devido ao espalhamento de resíduos radioativos, como foi visto em *Chernobyl* (Ucrânia - 1986) e *Fukushima* (Japão - 2011).

A energia elétrica do futuro, eletronuclear, precisa de uma forte presença da engenharia mundial, para a estruturação segura de suas operações no planeta, visto que atualmente (2018) o mundo possui 448 (quatrocentos e quarenta e oito) reatores nucleares (em centrais eletronucleares) operando em 33 (trinta e três) países gerando o equivalente a 394 GW (trezentos e noventa e quatro milhões de Watt), e ainda, 58 (cinquenta e oito) em construção e 154 (cento e cinquenta e quatro) em projeto. Acredita-se que até 2050, o número de reatores triplique acrescentando mais de 25% de energia elétrica no mundo.

Estes números ficam mais significativos quando olhamos o volume de resíduos nucleares produzidos pelas centrais nucleares antigas. Neste caso muitos países estão construindo abrigos subterrâneos em rochas para que sejam armazenados e lacrados longe do contato com os ecossistemas e a população humana. Fato é que não se pode conviver com este tipo de solução no futuro. Será necessário a desativação de reatores pouco eficientes e que não possam

reaproveitar o combustível nuclear (re-enriquecido). Assim como, que as centrais nucleares sejam construídas, já prevendo uma forma compacta de armazenamento dos resíduos radioativos em sua própria unidade.

O maior perigo dos resíduos radioativos não esta em seu armazenamento, que quase sempre é seguro, mas sim no transporte deste material até o local de armazenamento. Por isso prever nos requisitos de uma central nuclear moderna o local de armazenamento próprio, e o acondicionamento de material radioativo da central nuclear, é de suma importância.

No futuro próximo deverá existir uma agência realmente atuante, mesmo que venha a ser a IAEA reformulada, que de fato seja regulamentadora e fiscalizadora, e que possa de forma definitiva ajudar e orientar a construção e operação das centrais nucleares no futuro. Engenharia, informação, orientação e fiscalização, é tudo para que sejam minimizados os problemas relativos a centrais nucleares.

3.5. DISCUSSÃO ENTRE AS VANTAGENS E DESVANTAGENS DO EMPREGO DE ENERGIA ELETRONUCLEAR

Apesar dos vários protestos realizados contra novas centrais de energia elétrica, seja ela qual for, vem 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 estas pessoas críticas, é considerada uma prioridade para a espécie humana.

De fato somos seres consumidores vorazes de energia elétrica. 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 para a humanidade.

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 mini-centrais distribuídas.

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 eletronuclear, a opção mais robusta e eficiente. A energia nuclear é sem dúvida a fonte de energia mais eficiente disponível para a humanidade. Veja a Figura 9, com uma comparação entre as eficiências das fontes de energia para a produção de 1GW elétrico.

Figura 09 | Comparativo das eficiências dos combustíveis utilizados para gerar eletricidade



Fonte: WILTGEN (2003).

Observe na Figura 9, a diferença da quantidade de combustível para produzir 1GW 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.

4. O QUE ESPERAR PARA O FUTURO DA ENERGIA ELETRONUCLEAR

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, que possa ser solução e não um novo problema.

Novas fontes de energia, como solar, eólica, hídrica, energia das marés, energia geotérmica, serão uma importante contribuição. Entretanto, é um fato inegável que estas novas fontes de energias serão fundamentalmente 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 possui seus resíduos radioativos resultantes difíceis de lidar, e também, as principais reservas de urânio combustível nuclear que não radioativos o suficiente para serem utilizados nos reatores, além é claro da dificuldade da mineração e refino da matéria-prima. Esta matéria-prima precisa ser sintetizada e enriquecida artificialmente, não podendo ser encontrada na natureza.

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 (TERREMOTO 2004) 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. Veja a Figura 9, mostrando o comparativo das eficiências dos combustíveis utilizados para gerar eletricidade.

Em 2016 o Tokamak dos EUA, Alcator 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 longo tempo de confinamento. Precisando agora superar a densidade e a temperatura.

A máquina Chinesa novamente se mostrou um excelente experimento de fusão termonuclear controlada, em 13 de novembro deste ano de 2018, o EAST (Figura 10) conseguiu uma proeza, atendendo mais um dos requisitos das três condições de simultaneidade, agora a temperatura. Neste dia, o Tokamak EAST conseguiu exceder os 100 milhões de graus Celsius durante o tempo de confinamento de 101,9 (cento e um vírgula nove) segundos. Cerca de sete vezes a temperatura do Sol, que é de ~15 milhões de graus Celsius. Atendendo ao requisito de temperatura esperada para se obter um reator a fusão.

Desta forma, resta apenas o aumento da densidade do plasma. Acredita-se que o EAST consiga isto também, e depois provavelmente irão além, e farão o teste definitivo. Utilizando ao mesmo tempo os três parâmetros de simultaneidade juntos. 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, irá obter o primeiro *Break Even Point* em um Tokamak. Sendo o primeiro país a ter um reator termonuclear controlado do tipo Tokamak. Provavelmente possibilitando o desenvolvimento e fabricação deste reator como um produto, e vender este tipo de tecnologia para todos os outros países do mundo.

Figura 10 | Tokamaks Chinês EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) recorde em Temperatura (2018) e Tempo de Confinamento (2017) para a Fusão Nuclear



Fonte: WAN (2018).

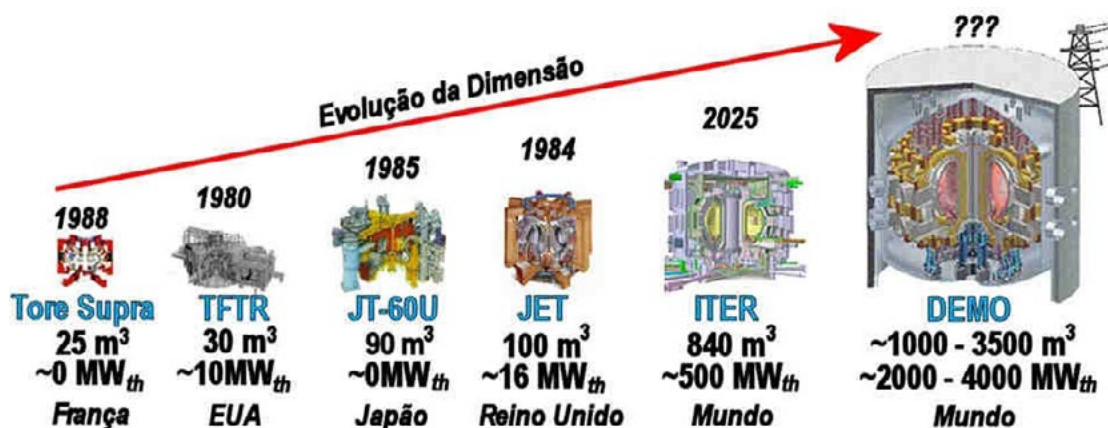
Se isto vier a se concretizar, a China, definitivamente será considerada a nação com maior poder tecnológico mundo, muito a frente da Rússia, EUA e Europa. Os EUA apostam que seus experimentos com Confinamento Inercial com Micro-Implosões de Pellets a Laser consigam obter um resultado satisfatório para prosseguir nas investigações científicas e quem sabe se tornar um produto. 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, vão ter 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 tem sido conduzidos em muitos laboratórios pelo mundo, em sua grande maioria com máquinas pequenas e médias. O 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, e todo um conhecimento inédito na área de engenharia de fusão termonuclear controlada.

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 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 11, é possível observar os parâmetros de volume de plasma, quantidade de energia gerada por fusão nuclear, ano de operação e país financiador. A figura 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.

Figura 11 | Evolução dos Dispositivos Tokamaks para Reatores a Fusão



Fonte: WILTGEN (2017).

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 nestes últimos 20 anos 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. 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.

Isto abrirá novas perspectivas para a humanidade, tanto no seu desenvolvimento sócio-econômico, 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.

5. CONCLUSÃO

No presente artigo foi apresentado o panorama atual da energia eletronuclear 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 existe um longo caminho a ser percorrido pelos governos, agências, engenheiros e pesquisadores. São dois os caminhos a serem seguidos: o *caminho tecnológico*, o que permitirá aproveitar ao máximo os benefícios de se utilizar a energia nuclear para obter a energia elétrica abundante, e o *caminho responsável*, com o compromisso de fazê-lo de forma coerente, segura e normatizada, com o apoio de políticas de segurança mundial, além de uma fiscalização comprometida com a segurança nas fases de desenvolvimento, projeto e construção das novas centrais eletronucleares quer sejam de fissão ou fusão nuclear.

Acredita-se que no futuro próximo existam tanto as centrais de fissão nucleares modernas e centrais de fusão termonucleares controladas. A utilização responsável de qualquer tipo de tecnologia permite seu aproveitamento seguro e eficaz. A fartura de energia elétrica elevará a qualidade de vida da raça humana, e ampliará em muito nosso conhecimento, permitindo a exploração efetiva do planeta e possibilitar que os seres humanos possam morar em outros planetas e no fundo dos oceanos da Terra.

REFERÊNCIAS

- ARTISIMOVICH, L.A., *Tokamak devices*, Nuclear Fusion, 12: 215-252, 1972.
- BIASI, R., *A Energia Nuclear no Brasil*, Biblioteca do Exército – Editora, Rio de Janeiro, 1979.
- BOYLE, F. I., *Plasmas en el laboratorio y en el cosmos*, México, Reverté Mexicana, 1968. CHEN, F.F., *Plasma physics and controlled fusion*, Plenum Press, New York, 1974.
- CHIAN, A.C.L. et al., *Programa nacional de física de plasmas e fusão termonuclear controlada*, Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Física, São Paulo, 1979.
- CONN, R.W., *The engineering of magnetic fusion reactors*, Scientific American, 249(4), 1983.
- ELIEZER, Y., ELIEZER, S. *The fourth state of matter - an introduction to the Physics of Plasma*, Bristol and Philadelphia, Adam Hilger, 1989.
- FURTH, H.P., *Tokamak Research*, Nuclear Fusion 15: 487-534, 1975.
- GA - Technologies - *Fusion Power Research - Annual Report*, California, 1990. HERMAN, R., *Fusion - The search for endless energy*, University Cambridge, USA, 1990.
- IAEA, *Nuclear Power Reactors in the World – Edition 2017*, Viena, 2017. (IAEA-RDS-2/37)
- LUDWIG, G.O., *Anteprojeto de engenharia do tokamak ETE*, São José dos Campos, Inpe, 1993. (Inpe - 5529 - PRE/1796)
- LUDWIG, G.O., *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)
- MURRAY, R. L., *Nuclear Energy*, Pergamon Press, Oxford, 1993.
- PÁMELA, J., Chatelier, M., *Des premiers tokamaks au projet ITER*, La Recherche, 299: 61-66, 1997.
- PAULETTI, R.M.O., *Projeto estrutural de reatores à fusão - passado, presente e futuro* (Tese de Doutorado) - Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1994.
- TELLER, E., *Fusion magnetic confinement*, Academic Press, New York, 1981.
- TERREMOTO, L. A. A., *Apostila de Pós-Graduação Disciplina TNRS764 – Fundamentos de Tecnologia Nuclear Reatores*, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), 2004.
- WAN, Y., *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.
- WESSON, J., *Tokamaks*, Oxford, Clarendon Press, 1987.
- WILTGEN, F. (Barbosa, L.F.W.), *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)
- WILTGEN, F. (Barbosa, L.F.W.), 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)
- WILTGEN, F. (Barbosa, L.F.W.), *Sistema Elétrico Pulsado com Controle Digital do Tokamak ETE (Experimento Tokamak Esférico)*, Dissertação de Mestrado, ITA, 1998.
- WILTGEN, F. (Barbosa, L.F.W.), 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 International Conference on Plasma Science - ICOPS, Las Vegas, USA, 17-22, June, 2001.

WILTGEN, F. (Barbosa, L.F.W.), *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.

WILTGEN, F., *Energia Eletronuclear: Fusão e Fissão*, Seminário apresentado na Semana de Engenharia Elétrica da Universidade de Taubaté no dia 18 de setembro, 2017.

WILTGEN, F., *Sistemas Inteligentes para o Controle de Plasma em Máquinas do Tipo Tokamak – Aplicação de Sistemas de Controle com Inteligência Artificial*, Novas Edições Acadêmicas, 2018.

WILTGEN, F., *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.