



**FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS –
FATECS
Engenharia Elétrica**

Giovanna Botelho Cintra
22009373

FUSÃO NUCLEAR: A ENERGIA DO FUTURO

BRASÍLIA
2023



GIOVANNA BOTELHO CINTRA

FUSÃO NUCLEAR: A ENERGIA DO FUTURO

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como um dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Civil, Elétrica ou de Computação do UniCEUB– Centro Universitário de Brasília

Orientador (a): **Luciano Henrique Duque**

BRASÍLIA
2023



GIOVANA BOTELHO CINTRA

FUSÃO NUCLEAR: A ENERGIA DO FUTURO

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como um dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Civil, Elétrica ou de Computação do UniCEUB – Centro Universitário de Brasília

Orientador (a): **Luciano Henrique Duque**

Brasília, 2023.

BANCA EXAMINADORA

Orientador (a): Luciano Duque
Mestre

Examinador (a) : Hugo Molina
Especialista

Examinador (a): Nathália Salomão
Especialista

FUSÃO NUCLEAR: A ENERGIA DO FUTURO

NUCLEAR FUSION: THE ENERGY OF THE FUTURE

Resumo: A energia elétrica é fundamental para a sobrevivência do humano moderno. Todos os indivíduos da espécie necessitam da eletricidade para realizar as tarefas do cotidiano, de higiene básica, alimentação, saúde e lazer. Com isso, os seres humanos estão sempre tentando inovar e achar soluções mais sustentáveis, eficientes e com bom custo benefício. Um exemplo dessa inovação é o avanço da tecnologia de fusão nuclear. A fusão é a junção de dois ou mais átomos para formar outro com maior número atômico, processo que ocorre no Sol, gerando luz e calor. Devido à enorme quantidade de calor necessário para realizar esse procedimento na Terra, foram criadas máquinas do tipo Tokamak para suportar a temperatura. Esses equipamentos utilizam poderosos campos magnéticos a fim de conter o plasma por um determinado período de tempo até que aconteça a fusão. Plasma é o conjunto de nêutrons, elétrons livres e átomos que perderam elétrons. O principal projeto em ação é o ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), financiado por 35 países e com desenvolvimento na França, que está previsto para ficar pronto e ser testado em 2025. Neste artigo, será explicado mais sobre o processo de fusão nuclear, a máquina Tokamak e todas as vantagens e desvantagens desse tipo de energia.

Palavras-chave: Energia renovável; fusão nuclear; campo magnético; Tokamak; ITER; plasma; energia nuclear.

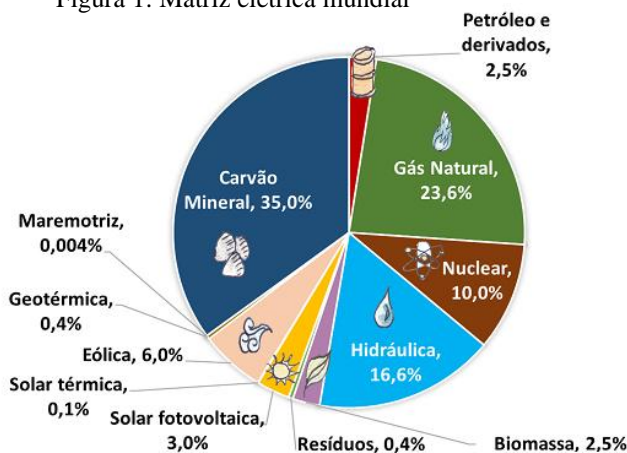
Abstract: Electrical energy is essential for the survival of modern humans. All individuals of the species are kept from electricity to carry out daily tasks, such as basic hygiene, food, health, and leisure. As a result, human beings are always trying to innovate and find more sustainable, efficient, and cost-effective solutions. An example of this innovation is the advancement of nuclear fusion technology. Fusion is the junction of two or more atoms to form another one with a higher atomic number, a process that occurs in the Sun, generating light and heat. Due to the enormous amount of heat required to perform this procedure on Earth, Tokamak machines were created to withstand the temperature. These devices use powerful magnetic fields to contain the plasma for a specific time until fusion occurs. Plasma is the set of neutrons, free electrons, and atoms that have lost electrons. The main project in action is the ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), funded by 35 countries and developed in France, which is expected to be ready and tested in 2025. In this article, more will be explained about the nuclear fusion process, the Tokamak machine, and all the advantages and efficiency of this type of energy.

Keywords: Renewable energy; nuclear fusion; magnetic field; Tokamak; ITER; plasma; nuclear energy.

1. Introdução

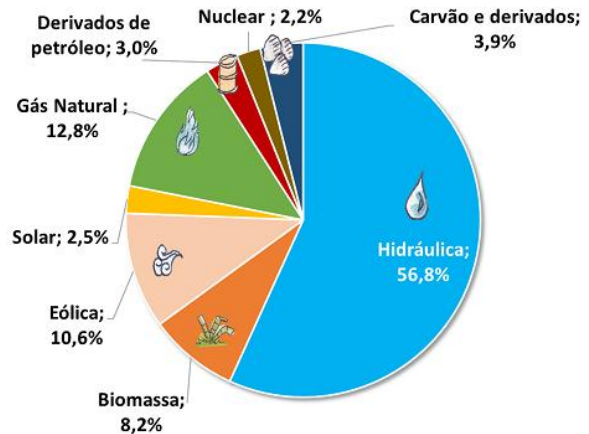
A evolução científica caminhou tão rápido nos últimos séculos, que hoje, os seres humanos não conseguiriam viver sem energia elétrica mais. O que começou com uma lâmpada incandescente, já virou painéis solares, usinas de energia, reatores de fusão, entre outras. Por várias décadas, cientistas do mundo todo trabalharam para conseguir energia de forma sustentável, limpa, ilimitada e eficiente. Atualmente, a matriz elétrica mundial corresponde a 2,5% de energia vinda do petróleo, 35% de carvão e 23,6% de gás, o que mostra que essa matriz é composta por aproximadamente 61,1% de combustíveis fósseis, ou seja, energia não renovável. Essa porcentagem é alta pois o mundo, em geral, utiliza em grande parte fontes não-renováveis, enquanto no Brasil, o cenário é completamente diferente, tendo a matriz composta por aproximadamente 83% de energia renovável.

Figura 1: Matriz elétrica mundial



Fonte: www.epe.gov.br - 2020

Figura 2: Matriz elétrica brasileira



Fonte: www.epe.gov.br - 2021

Um dos problemas de fontes não renováveis, além de degradação do meio ambiente, é que suas reservas são limitadas e muitas vezes estão sob o domínio de países específicos. Com isso, a venda de recursos energéticos acaba se tornando um assunto político e econômico, o que pode desencadear conflitos e desentendimentos. Um exemplo disso é a guerra da Rússia com a Ucrânia que teve início em 2021. Apesar do motivo ter sido geopolítico, com a possível entrada da Ucrânia na OTAN, isso impactou a comercialização de energia na Europa toda, gerando uma crise energética. Essa crise se desenvolveu porque a maior parte da Europa têm como fonte de energia principal o gás natural e um grande fornecedor de gás natural é a Rússia, o que causou uma crise, já que a Rússia sofreu penalidades e fechou os gasodutos. Sendo assim, os países europeus tiveram que correr atrás de outras fontes para abastecer seus cidadãos.

Há algumas décadas atrás, os cientistas descobriram uma forma de produzir energia ilimitada, energia por

fusão nuclear. Entretanto, não tinha sido descoberta a forma como fariam isso no planeta Terra, uma vez que esse processo exige altas temperaturas. Em 2006, começou a ser construído o projeto Reator Termonuclear Experimental Internacional, conhecido como ITER e sua montagem teve início em meados de 2010. Em meio a tanto caos no ano de 2021 na Europa, esse projeto seria a solução perfeita para evitar o transtorno com a falta de energia caso estivesse pronto e em funcionamento.

O ITER consiste em construir um reator para fundir átomos de núcleos leves, mais especificamente o dêuteron (próton mais nêutron) e trítio (próton mais dois nêutrons) em condições de temperatura e pressão exorbitantes. Nesse processo, aproximadamente 0,4% dos átomos citados, são convertidos em energia e, quando fundidos, formam um núcleo de Hélio (dois nêutrons e dois prótons) e um nêutron. Apesar de parecer pouca coisa, esses 0,4% representam o triplo do que uma usina comum gera hoje.

Como solução do problema da alta temperatura, os pesquisadores descobriram que a única forma de conseguir atingir uma temperatura superior a 100 milhões de graus, sendo dez vezes maior que a temperatura do Sol, é criando um campo magnético a fim de manter o plasma em combustão sem encostar em nada. O plasma aquecido será contido em uma estrutura com o nome de Tokamak para controle dessas reações. O projeto ITER tem como objetivo principal provar que é possível gerar energia através de fusão nuclear e, futuramente, comercializá-la.

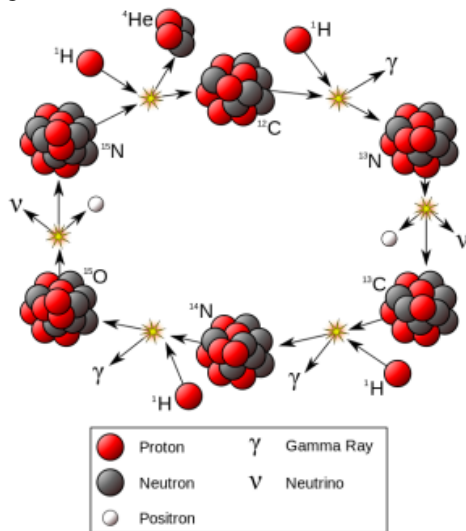
2. Evolução da fusão no mundo

A fusão nuclear é algo muito mais antigo do que parece. Apesar de

desenvolverem tecnologias e pesquisas mais avançadas somente em meados de 2010 em diante, esse tema é alvo de pesquisadores há muito tempo. De acordo com as fontes citadas, em 1920, o astrônomo Arthur Eddington (1882-1944) insinua a ocorrência de fusão nuclear nos seus estudos de modelos estelares. Entretanto, apenas nos anos 30 é que esse fenômeno foi estudado experimentalmente. Já em 1932, foi conseguida a fusão de isótopos de hidrogênio em laboratório e em 1939 o físico Hans Bethe (1906-2005) explica os processos do experimento existente nas estrelas. Hans demonstrou a capacidade, em termos energéticos, das reações de fusão por meio de sua pesquisa com núcleos estelares e revelou maneiras para a busca de uma solução de gerar energia usando fusão nuclear, aumentando a procura pela pesquisa que se tornou alvo do governo e de companhias privadas, já que essa reação é eficiente, segura e abundante.

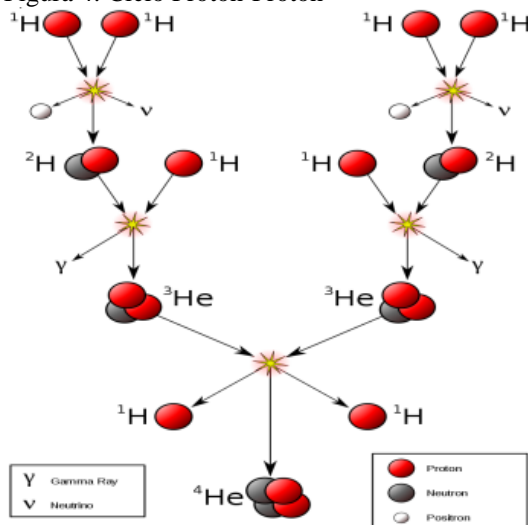
Bethe identificou os processos de energia que abastecem as estrelas, o que o levou a ganhar o prêmio Nobel. Ele descobriu dois ciclos importantes: o ciclo Próton-Próton para estrelas pequenas, como o Sol, e o CNO (carbono – nitrogênio – oxigênio) para estrelas grandes. No ciclo CNO, um núcleo de carbono-12 reagiria com um núcleo de hidrogênio, formando então o nitrogênio-13 e liberando um raio gama. No ciclo Próton-Próton, que será o foco do artigo, dois núcleos de hidrogênio reagem entre si e formam um deutério, liberando um neutrino e um pósitron, que reage com mais um núcleo de hidrogênio formando um núcleo de trítio. A reação acontece novamente então tem-se dois núcleos de trítio que interagem e formam um núcleo de hélio e dois de hidrogênio.

Figura 3: Ciclo CNO



Fonte: www.ocs.ifsp.edu.br - 2020

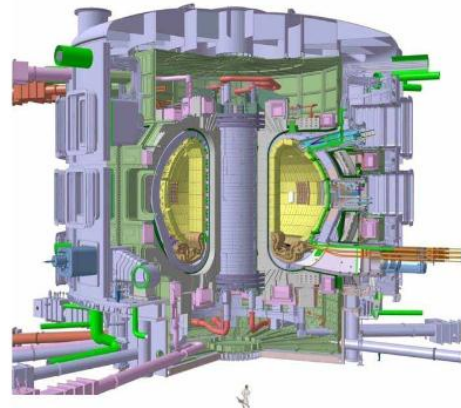
Figura 4: Ciclo Próton-Próton



Fonte: www.ocs.ifsp.edu.br - 2020

A partir dessas descobertas, começou então uma corrida mundial pelo alcance e domínio dessa tecnologia. Foram construídos laboratórios e máquinas mundo à fora com o objetivo de executar a prática o mais rápido possível, afinal se tratava da melhor forma de geração de energia do futuro. O dispositivo construído mais conhecido e eficaz foi o reator russo Tokamak, objeto de estudo deste artigo, que teve bons resultados em 1960.

Figura 5: Reator Tokamak



Fonte: www.rmct.ime.eb.br - 2021

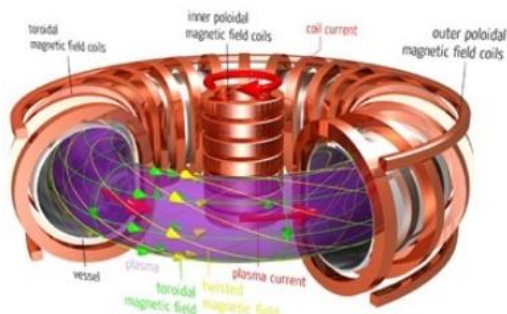
No final de 1993, a Universidade de Princeton foi capaz de gerar 5,6 milhões de Watts em uma fusão de forma controlada em seu reator Tokamak Fusion Test Reactor 2. Apesar do excepcional resultado obtido para a época, a energia usada para essa reação foi superior a gerada. Os estudos feitos nesse período consistiam em fundir dois núcleos para formar um novo núcleo liberando assim energia cinética que seria utilizada para aquecer a água. O vapor produzido é utilizado para mover as turbinas que estão conectadas a um gerador que transforma a energia mecânica do movimento em energia elétrica. De acordo com a pesquisa, a energia produzida é muito maior que na fissão nuclear, além de não produzir quase nada de lixo radioativo. A única preocupação, que poderia ser evitada tomando as medidas adequadas, em relação a esse processo, era o perigo da liberação do Hélio-3 por ser radioativo.

Apesar de descobrirem como produziram energia a partir desse método, os cientistas encontraram problemas físicos, tecnológicos e sociais. Na física, o principal desafio era como atingir o ponto onde as partículas α tornam-se a principal fonte do plasma

aquecido e determinar o comportamento desse plasma. Já na parte tecnológica, o desafio era construir e testar um reator que suporte as condições necessárias para gerar e manter o plasma. Por fim, a questão socioambiental era provar que esse método é favorável para o meio ambiente e seguro para o planeta.

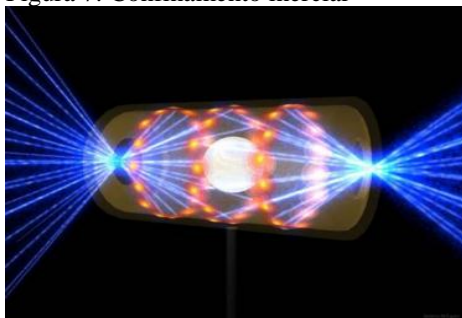
Após juntar os conhecimentos adquiridos desde 1930 sobre fissão e fusão nuclear, restringiu-se a expectativa de execução prática a duas ideias tecnológicas de reatores, ambas usando uma mistura de deutério e trítio, sendo uma delas por confinamento magnético, no qual potentes eletroímãs gerarão um campo magnético englobando o plasma e a segunda opção por confinamento inercial. Esse segundo caminho é inspirado no princípio de implosão da bomba termonuclear, com bombardeio simultâneo de potentes raios laser em vez de gatilhos como na fissão nuclear.

Figura 6: Confinamento magnético



Fonte: www.researchgate.net - 2014

Figura 7: Confinamento inercial



Fonte: ww.each.usp.br - 2015

O método de implosão nuclear consiste em um núcleo físsil que possui uma massa de plutônio em fase alotrópica, ou seja, podendo originar duas ou mais substâncias simples e diferentes entre si, estando na forma oca ou contendo uma fonte de nêutrons em seu interior. Em volta desse núcleo, pode haver uma ou mais camadas, sendo uma delas composta de urânio ou berílio por serem bons refletores de nêutrons, servindo como barreira. Por fim, essa casca é envolta por uma camada de explosivos químicos convencionais, que quando detonados em sincronia, gera uma onda de choque elétrica implodindo e comprimindo a massa físsil até as condições pretendidas. Para iniciar essa reação em cadeia, um dispositivo feito de polônio e berílio conhecido pelo nome de iniciador de nêutrons é inserido no centro da esfera fornecendo os nêutrons necessários.

Figura 8: Modelo de bomba atômica



Fonte: www.repositorio.unesp.br - 2014

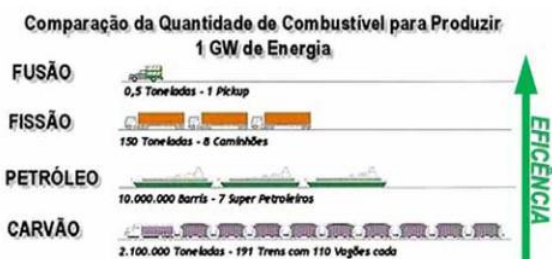
Como dito anteriormente, o combustível para as duas ideias tecnológicas citadas seria a mistura de trítio e deutério, dois isótopos de hidrogênio, ou seja, dois elementos que possuem o mesmo número de prótons e número de nêutrons diferentes. O trítio é naturalmente produzido quando raios cósmicos se colidem com moléculas de nitrogênio no ar da atmosfera superior e, de forma mais usual e artificial, através

da reação entre lítio-6 e nêutrons em reatores de fissão nuclear. Apesar de ser um elemento radioativo, apresenta meia vida de 12 anos, o que representa pouca coisa quando comparado com o urânio-235 que são setecentos milhões de anos. O deutério por sua vez, existe em abundância na natureza, podendo ser retirado da água do mar e não é um elemento radioativo.

Na reação de fusão nuclear, a massa do núcleo no final do processo é menor que a massa dos dois núcleos iniciais somadas. Essa diferença causa a liberação de uma imensa quantidade de energia, maior que na fissão nuclear. Estima-se que esse método produz dez vezes mais energia do que consumiu, isto é, a cada 1 unidade de energia consumida é produzida 10 unidades.

Para se ter uma ideia do potencial dessas reações, a fusão de 1 kg dessa mistura produz o mesmo tanta de energia que a queima de dez mil toneladas de carvão. Ou também, 1 grama pode liberar um montante de energia capaz de manter uma lâmpada de 100 Watts acesa por 940.000 anos, de acordo com estimativas feitas por estudiosos.

Figura 9: Eficiência da fusão nuclear



Fonte: www.rmct.ime.eb.br - 2021

3. Projeto de fusão e seus reatores

3.1 Projeto ITER

Ao analisar, no ponto de vista das relações internacionais, os desafios enfrentados na obtenção de energia através de fusão nuclear, pode se dizer que essa busca pela energia do Sol no planeta está mais próxima graças a criação de uma organização internacional. Resultado de uma negociação iniciada na Guerra Fria com o objetivo de diminuir as tensões entre Estados Unidos e União Soviética e moderar na corrida armamentista, o projeto ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) tem como membros fundadores a Euratom (Comunidade Europeia de Energia Atômica), China, Estados Unidos, Rússia, Índia, Japão e Coreia do Sul, totalizando 35 países.

Em 21 de Novembro de 2006, as potências econômicas mundiais assinaram um acordo internacional em Paris para a construção do mais poderoso reator experimental de fusão nuclear do mundo. No ano de 2010, quatro anos depois, o escolhido diretor geral do programa Osamu Motojima, inaugurou a sede do ITER em Cadarache, província francesa, dando início aos trabalhos. O ITER tem a responsabilidade da construção, operação, exploração e, futuramente, desativação das instalações do projeto, que teve seu local definido após uma intensa disputa entre França e Japão. De acordo com algumas fontes citadas, alguns autores veem o ITER como o “primeiro exemplo de globalização na ciência e na tecnologia”.

Figura 10: Construção do ITER



Fonte: www.brasil.elpais.com - 2016

Apesar de ser um experimento, o reator desse projeto será um gigante Tokamak composto por mais de um milhão de componentes de elevada tecnologia e com um peso de aproximadamente 23 mil toneladas. Uma de suas principais missões é atingir com sucesso o balanço energético positivo em uma proporção de um para dez, ou seja, a cada cinquenta MW consumidos deverá gerar quinhentos MWt em energia térmica. Embora esse projeto não almeje a produção de eletricidade, outro foco dele é a realização de testes simultâneos de todas as tecnologias que serão necessárias para a operação do futuro reator nucleoeletrico de demonstração – DEMO, sucessor do ITER – e da primeira geração de usinas comerciais. Com a iniciativa das setes partes envolvidas no projeto, cada uma com sua motivação, a energia nuclear deve deixar de ser a “eterna energia do futuro” dos laboratórios já na segunda metade desse século de forma concreta e viável economicamente.

A Organização ITER possui métodos de aquisições e financiamento diferenciados. De acordo com o autor Augusto Pestana, o artigo 8º de seu acordo construtivo, diz que as fontes de materiais poderão incluir “contribuições financeiras diretas (in cash) e

“contribuições em espécie (in kind)” – como componentes, bens e serviços, equipamentos e funcionários para o quadro de pessoas da Organização. Apesar de contribuições in kind serem comuns em organizações internacionais, sua proporção no ITER é diferenciada: cerca de dois terços são na etapa de construção do reator. A incumbência de sua montagem é da Organização, com base nos projetos e especificações definidas, porém a compra dos componentes é feita pelas partes envolvidas por meio de licitações. Os valores dessas aquisições são contabilizados como contribuição em espécie e expressos em “unidades de conta ITER” (IUA), que foi criado a fim de evitar desequilíbrios de paridade de compra ou ordem cambial. O orçamento in kind foi estimado no valor de 3,1 milhões de IUAs, sendo 5/11 para os europeus e 1/11 para cada um dos demais membros.

3.2 Tokamak

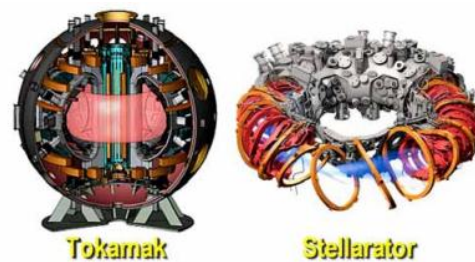
Em reatores nucleares, processos artificiais são criados por colisões de nêutrons com Urânio ou Tório, o que resulta na quebra dos elementos e emissão de nêutrons. Já em processos controlados, uma das formas para obter a fusão é através de confinamento magnético, onde o plasma com partículas carregadas, fica enclausurado por um campo magnético impedindo-o de esbarrar nas paredes. Com a temperatura alta devido aos raios laser, as partículas se movem rapidamente liberando energia, isto é, quanto mais quente mais rápida a velocidade delas e mais energia liberada. Um aparelho que funciona dessa forma na fusão nuclear é o Tokamak. O primeiro foi desenvolvido na antiga União Soviética e, após isso, vários outros países também construíram

esse reator ou estão em fase de construção. Tokamak em russo, quer dizer toroidal'naya kamera s magnitnymi katushkami ou “câmara toroidal com bobinas magnéticas”. De acordo com os estudos publicados, o plasma de um tokamak é confinado dentro da câmara de vácuo no formato de um toróide, isto é, na forma de uma argola ou aro pela geração de forças magnéticas em dois campos: toroidal (produzido por eletroímãs externos) e outro poloidal (produzido pela corrente elétrica que circula no próprio plasma com o movimento das partículas). Dentro da câmara do reator, com o hidrogênio gasoso se transformando em plasma sob pressão e calor extremos, sendo controlado e modelado, ele é confinado por bobinas que geram o campo magnético, para que, dessa forma, o resíduo não encoste nas paredes internas do reator, já que nenhum material suportaria tal temperatura.

Para iniciar a reação, a câmara de vácuo é, antes de tudo, evacuada para que nenhuma impureza interfira no procedimento, e enquanto o combustível gasoso (deutério e trítio) é colocado na câmara, o sistema de confinamento magnético é carregado. Cerca de cinquenta mega watts é posto no combustível, removendo elétrons dos núcleos de seus átomos, ionizando-os e transformando-os em plasma. Após ser energeticamente carregado, o plasma colide suas partículas e começa a se aquecer devido ao confinamento magnético e pressão e, com a ajuda de um aquecimento extra, ele é levado a uma temperatura entre aproximadamente 150 a 300 milhões de graus Celsius. Com isso, as partículas ultrapassam a repulsão eletromagnética gerando colisões e liberando imensas quantidades de energia.

Outro reator por confinamento magnético que concorre com o Tokamak é o Stellarator, que por sua vez é formado por dispositivos contínuos, isto é, produzem por um determinado e longo período de tempo uma coluna de plasma torcida. Em geral, a complexidade construtiva de um Stellarator é muito maior do que de um Tokamak e, além disso, é possível observar na figura abaixo que as bobinas do Stellarator possui uma geométrica diferente uma das outras e, dessa forma, compõe um campo magnético estável que possibilita manter a coluna de plasma na região de interesse por um grande período de tempo.

Figura 11: Tokamak e Stellarator



Fonte: www.rmct.ime.eb.br – 2021

Em tecnologias mais avançadas, a simplificação do processo sempre apresenta possibilidade de dar erro, mas não seria hiperbólico dizer que um reator de fusão por confinamento magnético funciona à base de água e de lítio, metal esse em abundância e com cerca de 60% de suas reservas na América do Sul, mais precisamente na Bolívia, na Argentina e no Chile. As possibilidades mais promissoras são apresentadas pela rota magnética, principalmente de um tokamak, que é, de longe, o experimento mais testado e bem-sucedido na história da fusão.

3.3 ITER em números

23 mil toneladas – O reator ITER pesará 23 mil toneladas no final de sua construção, equivalente ao peso de três Torres Eiffel. Aproximadamente um milhão de componentes e dez milhões de materiais farão parte dessa complexa máquina.

400 mil toneladas – Aproximadamente 400 mil toneladas de material ficarão na parte inferior do “complexo do tokamak”, incluindo três construções, a máquina de 23 mil toneladas e todos os seus equipamentos. No total, o peso de todas as partes é maior que o peso do Empire State Building, localizado em Nova Iorque.

100 mil quilômetros – As 18 bobinas toroidais, com 17 metros de altura cada, serão enroladas com fios supercondutores feitos de uma liga de nióbio-estanho (Nb3Sn). Mais ou menos 100 mil quilômetros desse fio foi fabricado pelas indústrias de seis países membros do ITER: China, Japão, Estados Unidos, Europa, Coréia e Rússia, representando um recorde de produção.

104 quilômetros – Os componentes mais pesados do reator ITER foram enviados de navio para For-sur-Mer, porto francês no Mediterrâneo mais próximo do local de construção. Depois, eles serão transportados por 104 quilômetros em uma pista especialmente modificada conhecida como “ITER itinerary”. As dimensões desses componentes são surpreendentes: a base de criostato, item mais pesado, pesará em torno de 900 toneladas incluindo o veículo de transporte. O maior anel magnético feito na China terá aproximadamente 10 metros de altura e pesará 1000 toneladas.

4000 pessoas – Mais de 3 mil pessoas trabalha na sede da organização internacional e nas páginas online do ITER. Esse número provavelmente excederá 4 mil no auge da construção e montagem. Esses dados são de 2021 e podem ter mudado no ano da escrita desse artigo.

15 mil visitantes por ano – Desde a abertura do local em 2007, mais de 200 mil pessoas visitaram o ITER. Em grupos, com a família ou até mesmo sozinho, as visitas são possíveis com registro antecipado. Além disso, o ITER também proporciona o que eles chamam de “Open Door” duas vezes por ano.

150 milhões de graus Celsius – A temperatura necessária para aquecer o plasma e gerar grandes quantidades de energia está entre 150 e 300 milhões de graus Celsius. Para se ter uma ideia, a temperatura máxima que o núcleo do Sol alcança está em torno de 15 milhões de graus Celsius, isto é, o laser do reator aquecerá 10 vezes a mais que o Sol.

13 bilhões de dólares – O projeto bilionário conhecido como ITER já gastou com contribuições in kind, ou seja, materiais, bens e serviços, funcionários, entre outros, cerca de 13 bilhões de dólares. Quando somar as contribuições in cash ou contribuições financeiras diretas, esse valor tende a chegar por volta de 25 bilhões de dólares, podendo aumentar com a inflação e crises mundiais.

4. Tokamaks pelo mundo

4.1 Tokamak no Brasil

De acordo com o site do governo brasileiro, existem hoje no Brasil três tokamaks em atuação: e ETE, operado pelo antigo Laboratório Associado de Plasma (LAP) do INPE, o TCABR,

operado pelo Laboratório de Física de Plasmas (LFP) do IFUSP e o NOVA-UFES, operado pelo Laboratório de Plasma Térmico (LPT) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). O TCABR (Tokamak à Chauffage Alfvén Brésilien) foi construído pelo Centre de Recherches en Physique des Plasmas da Escola Politécnica Federal de Lausanne, na Suíça e, um tempo depois, transferido para o LFP, onde começou a operar em 1999. O objetivo de sua construção era investigar ondas de Alfvén, ondas magnetohidrodinâmicas de baixa frequência que se propagam na direção do campo magnético através da oscilação de íons desempenhando um papel importante na estabilidade dos dispositivos de confinamento magnético, e como utiliza-las para aquecer o plasma.

Por ser um tokamak de pequeno porte, o TCABR possui vantagens quando comparado com maiores. O acesso à máquina é mais simples e exige uma pequena quantidade de pessoas na equipe para operá-la. Além disso, é mais fácil instalar algum equipamento novo e realizar vários disparos para a execução de testes, uma vez que o tempo de funcionamento dela é mais acessível economicamente. Por ser antigo, esse tokamak precisa sempre estar sendo atualizado e, por isso, estão sendo projetadas quatro iniciativas: (i) a instalação de ladrilhos de grafite para recobrir a parede interna da câmara de vácuo, (ii) a instalação de bobinas adicionais para controle da posição e forma do plasma, (iii) instalação de um conjunto novo de bobinas de perturbação magnética ressonante (RMP) e (iv) o desenvolvimento de um sistema de injeção de helicidade.

Figura 12: Tokamak TCABR



Fonte: www.gov.br/cnen - 2021

O Experimento Tokamak Esférico (ETE) foi desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) e a construção deste foi feita em parceria com o Laboratório Associado de Plasma, o que custou 2,2 milhões de reais, entrando em operação em 2000. Esse reator foi projetado para operar em, no máximo, 5 MW e tem como objetivo a produção de radioisótopos para medicina nuclear, estudos de física nuclear e pesquisas para o tratamento de câncer. Como é mostrado nos artigos citados na referência, em operação, ele tem capacidade de produzir gases ionizados que possuem elevada energia térmica à temperatura de 2 milhões de graus Celsius, plasma e não produz lixo radioativo como o urânio. Em caso de interrupção no seu funcionamento, defeito ou algum vazamento, a reação é 100% interrompida, já que ele opera em condições muito específicas.

Figura 13: Tokamak ETE



Fonte: www.gov.br/cnen - 2021

O NOVA-UFES está atualmente no Brasil porém, foi construído pela Universidade Kyoto, no Japão. Após sua chegada no país, ele, inicialmente, foi operado pela Universidade de Campinas (UNICAMP), pela Universidade Federal do Rio Grande (FURG) e, desde então, está localizado na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Esse reator é um tokamak pequeno, assim como os outros, e está sendo melhorado com um sistema de injeção de helicidade (Figura 14) utilizando tochas de plasma. Com o equipamento em operação, os estudantes e pesquisadores planejam desenvolver dispositivos inovadores para aumentar a temperatura do plasma e prova-los através de experimentos.

Figura 14: NOVA-UFES em funcionamento



Fonte: www.gov.br/cnen - 2021

Figura 15: Tokamak NOVA-UFES



Fonte: www.gov.br/cnen - 2021

4.2 Reatores no mundo

4.2.1 Tokamak Demo

O reator DEMO é o sucessor do reator ITER e vem de “DEMOstration”, ou seja, será uma usina de demonstração. Com a transição do ITER para o DEMO, a fusão irá sair de um “simples” experimento científico de laboratório para uma escala industrial com um avançado programa tecnológico. O critério fundamental para essa evolução é a produção de eletricidade, embora preço e quantidade de usinas comerciais não sejam um problema. Os experimentos de fusão foram inicialmente feitos para investigar a física do plasma e seu comportamento. Entretanto, o DEMO precisa demonstrar a tecnologia necessária não só para controlar um plasma mais poderoso do que o existente, mas também para gerar eletricidade com segurança de forma consistente e para a manutenção regular, rápida e confiável da usina. Construir e operar o DEMO, que ligará a eletricidade vinda da fusão à rede, é o tema da última fase do roteiro da EUROfusion. O DEMO está sendo projetado para ser o maior reator do mundo já construído, uma vez que seu objetivo é ter capacidade para abastecer o máximo de estabelecimentos que conseguir.

Figura 16: Tokamak DEMO



Fonte: www.euro-fusion.org - 2023

Figura 17: Comparação dos Tokamaks



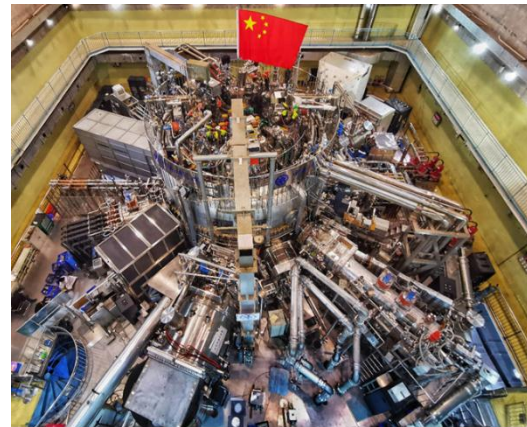
Fonte: www.rmct.ime.eb.br - 2021

4.2.2 Tokamak EAST

No dia 3 de Julho de 2017, a China alcançou um feito muito importante em seu tokamak EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak). O Instituto de Pesquisa de Hefei conseguiu manter uma coluna de plasma em um confinamento de alta energia por 101,2 segundos. Essa conquista é muito importante para o avanço da fusão nuclear visto que atendeu uma parte das três condições de simultaneidade durante o tempo de confinamento. Em 13 de Novembro de 2018, o reator chinês se revelou, mais uma vez, um surpreendente experimento de fusão controlada, quando atendeu outra condição de simultaneidade com a temperatura. Neste dia memorável, o tokamak da China conseguiu ultrapassar os 100 milhões de graus Celsius durante o tempo de confinamento de 101,9 segundos. Atendendo esses dois quesitos, só faltou conseguir o aumento da densidade do plasma para se tornar um reator a fusão. Desde então, os cientistas tem se dedicado para atingir

os três marcos ao mesmo tempo e tornar o EAST a primeira máquina a atingir o “Break Even Point” ou ponto de equilíbrio, antes mesmo do ITER.

Figura 18: Tokamak EAST

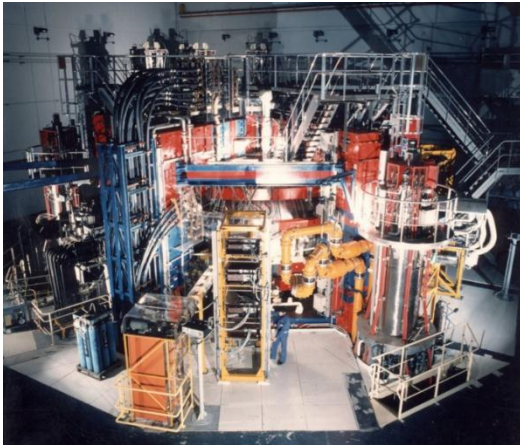


Fonte: <http://east.ipp.ac.cn/> - 2022

4.2.3 Tokamak WEST

O Tore Supra tokamak ou, como é conhecido hoje, WEST (W Environment in Steady-state Tokamak, onde W é o símbolo químico do tungstênio) foi construído por alguns parceiros internacionais como a China, Europa, Índia, Coréia e EUA. O objetivo desse tokamak é preparar o projeto ITER abrindo caminho para a operação do desvio de tungstênio resfriado ativamente e dar apoio as prováveis atividades do DEMO. O reator WEST promete trazer respostas a tempo para o segundo desviador que está previsto para a fase nuclear do ITER.

Figura 19: Tokamak WEST

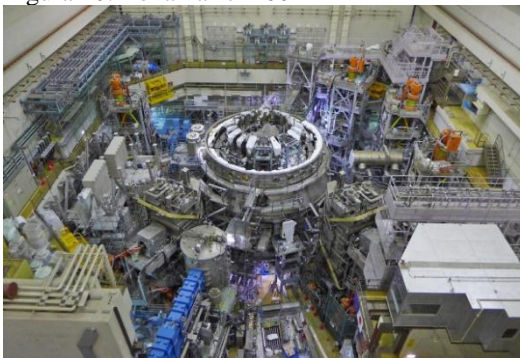


Fonte: www.iter.org - 2010

4.2.4 Tokamak JT-60

O JT-60, construído pelo Japão e Europa, é mais um reator feito para ajudar o ITER. Os maiores objetivos desse tokamak são estabelecer bases científicas para o projeto bilionário e explorar um novo domínio do plasma tornando o reator de fusão mais atraente. Engenheiros e cientistas do ITER trabalharão juntamente com o time do JT-60 para obter conhecimentos valiosos em sua montagem e nos primeiros testes com o plasma, ajudando a diminuir os riscos no ITER.

Figura 20: Tokamak JT-60

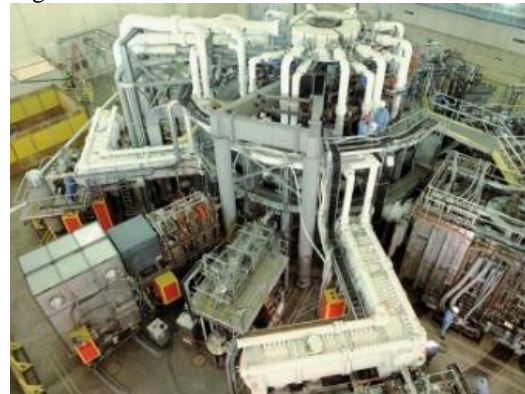


Fonte: www.fusionforenergy.europa.eu - 2020

4.2.5 Tokamak TFTR

O TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor) operou no laboratório de física que estuda plasmas de Princeton de 1982 até 1997. Esse reator foi muito importante para o estudo de fusão nuclear atingindo todos os seus objetivos e conquistando várias marcas importantes para a época, como alcançar a temperatura de 510 milhões de graus Celsius, o maior número atingido em laboratório. Em Dezembro de 1993, o TFTR se tornou o primeiro reator magnético de fusão do mundo a realizar longos experimentos com plasmas compostos de 50/50 deutério/trítio. Consequentemente, em 1994, o tokamak bateu o recorde mundial por produzir 10,7 milhões de watts de fusão controlada, o suficiente para abastecer mais de 3 mil casas.

Figura 21: Tokamak TFTR



Fonte: www.pppl.gov - 2023

4.2.6 Tokamak JET

JET (Joint European Torus) entrou em operação em 1983. Pela primeira vez na história da fusão foi possível com ele, em 1991, a liberação de uma quantidade de energia por fusão controlada durante 2 segundos liberando 1,8 megawatt. Em 1997, esse tokamak

também experimentou uma mistura de combustível composta por deutério e trítio em quantidades iguais, proporcionando um recorde mundial com potência de 13 megawatts e a fusão de energia de 14 megajoules. No final de 2021, conseguiu uma produção estável de plasma composto por deutério-trítio com o material da parede do ITER (berílio e tungstênio), gerando uma energia de 59 megajoules, mais que o dobro da geração de 1997. Atualmente, o objetivo principal do JET é preparar para a construção e operação do ITER, servindo de teste para as novas tecnologias e experimentos com plasma.

Figura 22: Tokamak JET



Fonte: www.cfe.ukaea.uk - 2019

aproveitar ao máximo as vantagens desse tipo de energia para obter energia elétrica. O Brasil possui um interesse nessa tecnologia e até desenvolveu algumas máquinas porém, necessita muito de pesquisadores, incentivos e financiamento nessa área de geração de energia ficando com um papel secundário nos projetos internacionais.

Logo, pode-se concluir que a energia nuclear é o futuro da humanidade por ter um combustível acessível e ilimitado, não gerar lixo radioativo e gases poluentes, além de ser um método seguro, pois caso tenha algum problema, o processo é totalmente interrompido. Também, é possível concluir que o Brasil precisa aprimorar a geração a partir desse tipo de energia, especializar sua equipe de pesquisadores para que consiga se adequar nesse novo cenário mundial.

5. Conclusão

A demanda por energia mundial aumenta cada dia mais e a energia nuclear gera energia segura, eficiente, limpa e tende a ser infinita para abastecer o mundo todo. Mais de 400 reatores experimentais estão em construção ou operação espalhados em 30 países e, com isso, os cientistas fizeram imenso progresso no reator ITER, mesmo havendo muitos problemas a serem resolvidos no projeto. Para que essa tecnologia seja efetiva, ainda existe um longo caminho a ser trilhado pelos cientistas, engenheiros, investidores e governos, e, quando esse grupo de pessoas atingir seus objetivos, poderão

6. Referências Bibliográficas

- Wiltgen, Filipe. (2022). “Eletricidade via fusão nuclear”. Artigo. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/20324/209209216954>
- Wiltgen, Filipe. (2022). “Fusão nuclear via máquina tokamak – energia elétrica para o futuro desenvolvimento humano”. Artigo. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Filipe-Wiltgen/publication/362906633_FUSAO_NUCLEAR_VIA_MAQUINA_TOKAMAK_-_ENERGIA_ELETRICA_PARA_O_FUTURO_DO_DESENVOLVIMENTO_HUMANO_NUCLEAR_FUSION_VIA_TOKAMAK_MACHINE_-_ELECTRIC_ENERGY_FOR_THE_FUTURE_OF_HUMAN_DEVELOPMENT/links/630676db61e4553b9536497a/FUSAO-NUCLEAR-VIA-MAQUINA-TOKAMAK-ENERGIA-ELETRICA-PARA-O-FUTURO-DO-DESENVOLVIMENTO-HUMANO-NUCLEAR-FUSION-VIA-TOKAMAK-MACHINE-ELECTRIC-ENERGY-FOR-THE-FUTURE-OF-HUMAN-DEVELOPMENT.pdf
- Wiltgen, Filipe. (2022). “Futuro reator a fusão nuclear do tipo tokamak – máquina de engenharia desafiadora”. Artigo. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Filipe-Wiltgen/publication/362605172_FUTURO_REATOR_A_FUSAO_NUCLEAR_DO_TIPO_TOKAMAK_-_MAQUINA_DE_ENGENHARIA_DESAFIADORA_FUTURE_TOKAMAK_TYPE_NUCLEAR_FUSION_REACTOR_-_CHALLENGING_ENGINEERING_MACHINE/links/62f3bbc7b8dc8b4403d2ca5d/FUTURO-REATOR-A-FUSAO-NUCLEAR-DO-TIPO-TOKAMAK-MAQUINA-DE-ENGENHARIA-DESAFIADORA-FUTURE-TOKAMAK-TYPE-NUCLEAR-FUSION-REACTOR-CHALLENGING-ENGINEERING-MACHINE.pdf
- Ciência Hoje. (2016). “O ITER”. Artigo. Disponível em: <https://cienciahoje.org.br/artigo/o-iter/>
- Pestana, Augusto. (2014). “ITER. Os caminhos da energia de fusão e o Brasil”. Tese. Disponível em: <http://funag.gov.br/loja/download/1132-iter-os-caminhos-da-energia-de-fusao-e-o-brasil.pdf>
- Wiltgen, Filipe. (2021). “Energia elétrica via fusão termonuclear controlada”. Artigo. Disponível em: https://rmct.ime.eb.br/arquivos/RMCT_3_tri_2021/RMCT_56220.pdf
- PET SI. (2015). “Simulação da Interação Laser-Matéria”. Acessado em 15 de maio de 2023. <http://www.each.usp.br/petsi/?p=5275>
- Proll, Josefine. (2014). “Trapped-particle instabilities in quasi-isodynamic stellarators”. Tese. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/131815/000852965.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Pocay, Márcio. (2014). “Física e música: o uso de canções como ferramenta auxiliar no Ensino de física”. Monografia. Disponível em:

<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/131815/000852965.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Da Silva, Daniel. (2014). “Influência do vetor isotópico do plutônio na distribuição de temperatura no interior de um hipotético explosivo visando à análise para a não proliferação nuclear”. Dissertação. Disponível em:

<https://bdex.eb.mil.br/jspui/bitstream/123456789/9377/1/A1%20Daniel%20Cunha.pdf>

Wiltgen, Filipe. (2022). “Fusão nuclear – A energia do universo”. Artigo. Disponível em:

https://www.researchgate.net/profile/Filipe-Wiltgen/publication/365202071_ARTIGO_FUSAO_NUCLEAR_-_A_ENERGIA_DO_UNIVERSO_PAPER_NUCLEAR_FUSION_-_THE_ENERGY_OF_THE_UNIVERSE/links/636a7ca954eb5f547cb33592/ARTIGO-FUSAO-NUCLEAR-A-ENERGIA-DO-UNIVERSO-PAPER-NUCLEAR-FUSION-THE-ENERGY-OF-THE-UNIVERSE.pdf

Freitas, Felipe. (2020). “Fusão nuclear: História, panorama atual e perspectivas para o futuro”. Artigo. Disponível em:

<https://ocs.ifsp.edu.br/index.php/conict/xiconict/paper/download/6904/1896>

El País. “O maior projeto de pesquisa sobre a Terra se torna mais sério”. Acessado em: 8 de junho de 2023.

https://brasil.elpais.com/brasil/2016/10/20/ciencia/1476987960_640489.html

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. “Matriz energética e elétrica”. Acessado em 15 de março de 2015.

<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>

Canal, Gustavo. (2021). “Modernização do tokamak TCABR para estudos de supressão de ELMs por campos RMP”. Seminário. Disponível em:

https://www.gov.br/cnen/pt-br/assunto/pesquisa-desenvolvimento-e-ensino-na-area-nuclear/copy_of_GustavoPaganiniCanalModernizaodoTokamakTCABRparaEstudosdeSupressodeELMsporCamposRMP_compressed1.pdf

Puglia, Paulo. (2015). “Identificação e localização de ondas de alfvén excitadas no plasma de um tokamak”. Tese. Disponível em:

<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43134/tde-24092015-141928/publico/TesePauloPuglia.pdf>

Ferreira, Júlio. (2021). “Modernização do Experimento Tokamak Esférico”. Seminário. Disponível em:

<https://www.gov.br/cnen/pt-br/assunto/pesquisa-desenvolvimento-e-ensino-na-area-nuclear/JulioGuimaraesFerreiraINPEModernizaodoExperimentoTokamakEsfricoETE.pdf>

CNEN, INPE, IFSP. (2021) “Proposta de programa nacional de fusão nuclear”. Seminário. Disponível em:

https://www.gov.br/cnen/pt-br/assunto/pesquisa-desenvolvimento-e-ensino-na-area-nuclear/copy2_of_GustavoPaganiniCanalPropostadeProgramaNacionaldeFusoNuclear_compressed.pdf

Eurofusion. “Demonstration Power Plant DEMO”. Acessado em 10/06/2023.

<https://euro-fusion.org/programme/demo/>

EAST. “Brief Introduction”. Acessado em 10/06/2023.

<http://east2.hfsxw.cn/index/article/info/id/52.html>

ITER. “TORE SUPRA looking WEST for the second ITER divertor”. Acessado em 10/06/2023.

<https://www.iter.org/fr/newsline/158/531>

Fusion for Energy. “Europe and Japan complete JT-60SA, the most powerful tokamak in the world!”. Acessado em: 10/06/2023.

<https://fusionforenergy.europa.eu/news/europe-and-japan-complete-jt-60sa-the-most-powerful-tokamak-in-the-world/>

Fusion for Energy, QST. “What is JT-60SA?”. Acessado em 10/06/2023.

<https://www.jt60sa.org/wp/>

PPPL. “Tokamak Fusion Test Reactor”. Acessado em 11/06/2023.

<https://www.pppl.gov/tokamak-fusion-test-reactor>

PPL. (1987). “Fast current ramp experiments on TFTR”. Relatório. Disponível em:

https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/66564787/6158948-libre.pdf?1619134216=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DFast_current_ramp_experiments_on_TFTR.pdf&Expires=1686750370&Signature=CvePn6pMzkljgZogEWXhvHDFfyr24AKR3k6Kn14f9UarPBCZ95KTNcij7TMBg6hUFk2UVnQqsAaKVA4ePU~LMJWviRr4DSlkiVdR6V10jsh6Iq~RphriHzKxIfbKf41hKm8ULQi-FnR88gGziqQQelKmQtCNSPeg6J3zrhrJMeT55MLSXvXmDYgKhQMBUeM83i~U5l-Cvi6VzcvjK5HimunopNF2W5rKUd6afkKVmWIWweKCHWqRiLinsPrBZiBvFsstNV10kiGb4TrqH0638UbOs3IqDJKTuUzgPKVWKP6E1qgCtifidvuSswRKcYbb-afMHCdOPH1SK-TrIbTvRw_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

CCFE. “Recording heating power achieved on JET”. Acessado em 11 de junho de 2023.

<https://ccfe.ukaea.uk/record-heating-power-achieved-on-jet/>

Marcet, G. (2023). “Analytical and MonteCarlo approaches to infer the total gamma ray emission from the JET tokamak”. Artigo. Disponível em:

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/18/05/C05020/pdf>

Ikeda, Kanami. (2009). “ITER on the road to fusion energy”. Artigo. Disponível em:

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0029-5515/50/1/014002/meta>