

## **ELETRICIDADE VIA FUSÃO NUCLEAR**

Filipe Wiltgen – Universidade de Taubaté  
E-mail: LFWBarbosa@gmail.com ou Filipe.Wiltgen@unitau.br

**Resumo:** Este artigo apresenta de forma simples, clara e objetiva, a eletricidade via fusão nuclear. A indissolúvel relação da espécie humana com a energia elétrica, a profunda compatibilidade entre a energia e o desenvolvimento humano, o paradigma entre energia e a sustentação da vida, a produção de energia elétrica no mundo e no Brasil. A reação da fusão nuclear e os principais meios de obter este processo aqui na Terra. A máquina destinada a ser o primeiro reator a fusão nuclear no mundo, seu funcionamento, suas características operacionais e sua breve história científica. A construção dos reatores Tokamak para a fusão termonuclear controlada para garantir o suprimento de eletricidade necessário para a continuidade do desenvolvimento dos humanos na Terra e fora dela. Por fim, é discutida a perspectiva futura para os possíveis desdobramentos advindos da possibilidade de uma abundância sem precedentes de energia elétrica para a humanidade, suas benefícios e responsabilidades perante a vida na Terra.

**Palavras-chave:** Energia, Eletricidade, Fusão Nuclear, Plasma, Tokamak.

## **ELECTRICITY VIA NUCLEAR FUSION**

**Abstract:** This paper presents, in a simple, clear and objective way, electricity via nuclear fusion. The indissoluble relationship of the human species with electric energy, deep compatibility between energy and human development, paradigm between energy and sustenance of life, production of electric energy in the world and in Brazil. The nuclear fusion reaction and main means of achieving this process here on Earth. The machine destined to be the first nuclear fusion reactor in the world, its functioning, its operational characteristics and its brief scientific history. The construction of Tokamak reactors for controlled thermonuclear fusion to ensure supply of electricity necessary for continued development of humans on Earth and beyond. Finally, the future perspective is discussed for possible consequences arising from possibility of an unprecedented abundance of electrical energy for humanity, its benefits and responsibilities towards life on Earth.

**Keywords:** Energy, Electricity, Nuclear Fusion, Plasma, Tokamak.

### **1. Introdução**

A evolução científica é de fato a solução para os problemas da humanidade, também é forma mais correta de entender a intrincada relação entre a humanidade e a energia elétrica (WILTGEN, 2022C; WILTGEN, 2022D, WILTGEN, 2022E).

Tudo teve início com lâmpada elétrica, e vieram junto os circuitos elétricos, condutor elétrico, as chaves de contato, geradores, transformadores de potência, motores, e tudo mais do mundo elétrico. Foi uma revolução no mundo, e isso impactou a humanidade de uma forma incrível e surpreendente, com inúmeras oportunidades para os mais variados tipos de equipamentos que surgiram utilizando a eletricidade (WILTGEN, 2022F).

O mundo atual não suportaria ficar alguns dias sem eletricidade, e não é referente a comodidade, conforto ou mesmo as facilidades do dia a dia, e sim com relação a sobrevivência humana, medicamentos, tratamentos, hospitais, alimentos, elevadores, iluminação, comunicação, transportes, bombeamento água, de gás, de combustíveis, e tudo que precise de eletricidade. A relação da espécie humana com a eletricidade é algo indissolúvel (WILTGEN, 2022C; PASTERNAK, 1998).

O fato de que a energia impacta na economia e na relação produtiva mundial, por si só é um parâmetro muito importante, visto que é a transformação dos insumos com a eletricidade que existe a produção industrial que permite a uma nação gerar capital e

divisas economicas. Estas divisas são traduzidas em um índice chamado de Produto Interno Bruto (PIB), ou seja, a capacidade de uma nação de produzir capital na forma de produtos, mesmo que seja em recursos naturais diretamente explorados (comodities).

Uma nação com elevado PIB permite a sua população desfrutar de melhores índices de educação, saúde, e moradias. Permite uma drástica redução na Taxa de Mortalidade Infantil (TMI) o que possibilita entender a profundidade e complexidade da relação da humanidade com a energia elétrica. Maior produção e fatura de eletricidade em um país reflete indiretamente em uma redução na TMI desta nação (WILTGEN, 2022C).

A estagnação advinda da escassez de recursos energéticos e de eletricidade faz com que uma nação venha a sofrer gravemente com a falta de condições básicas de sobrevivência de seu povo. Isso é visível em muitos países pelo mundo, de forma mais patente nos países da África Central cujo os índices de TMI para crianças abaixo de 5 anos de idade chegam a ser ~12%-15% na população. Isso é alarmante, imagine perder ~15 crianças a cada 100 (~150 crianças a cada 1.000) por falta de recursos básicos. No Brasil a TMI atual é cerca de ~1 criança a cada 100 (~10 crianças a cada 1.000), e isso é muito preocupante, pois nos países do primeiro mundo como a Islândia a TMI é de ~0,3 crianças a cada 100 (o que equivale a ~3 crianças a cada 1.000) (MOHAMMED and AKUOKO, 2022; SMITH *et al.*, 2013, WILTGEN, 2022E).

A melhor distribuição de renda no mundo caminha junto com o desenvolvimento e a evolução da ciência nas pesquisas em energia, principalmente na energia elétrica. Apenas com a geração de eletricidade de forma ampla, irrestrita, abundante e com valores diminutos é que pode-se mudar a condição de vida da espécie humana, evitando assim o desequilíbrio, os conflitos, a pobreza, a fome e a morte prematura.

Um caminho é a fusão nuclear utilizando máquinas do tipo Tokamak na geração de eletricidade com uma eficiência jamais presenciada antes no mundo, pode conseguir mudar a forma do convívio e do desenvolvimento da espécie humana, e assim, permitir a transformação de toda a humanidade.

Este artigo tem como objetivo principal apresentar de forma clara e simples algumas perguntas óbvias, as quais as respostas não são tão óbvias. Porquê a eletricidade é importante para a espécie humana? Como ter eletricidade via a fusão nuclear? Como obter a fusão nuclear na Terra? Porquê a fusão nuclear ainda não está disponível para a humanidade? E principalmente a grande questão de todas, quando a fusão nuclear será uma realidade no dia a dia humano? Por fim, é apresentada uma perspectiva do que esta por vir, como será o mundo com a fusão nuclear, e estimar como será o futuro do desenvolvimento humano depois da fusão nuclear.

## **2. Energia Elétrica e o Desenvolvimento Humano**

A eletricidade impulsionou a modernização da indústria com a substituição das máquinas movidas a vapor, aumentando significativamente o fator de disponibilidade, o que impactou diretamente na produtividade, e assim, na lucratividade econômica. Todo o setor produtivo ficou mais eficiente.

Foi rápida a percepção da inovação advinda do uso da eletricidade nas tarefas humanas, não só na indústria, mas incluindo também o lazer, o conforto e todas as vantagens da vida moderna. A utilização de uma infinidade de eletrodomésticos permitiu uma mudança significativa também dentro dos lares.

Com a progressão do uso da eletricidade surgiram rapidamente as grandes centrais energéticas. Primeiramente as centrais elétricas utilizando energia cinética convertida da energia potencial advinda de um reservatório de grande quantidade de água de rios represada a montante, forçada a passar por uma turbina hidráulica a qual era acelerada pela diferença de altura (energia cinética). Estas turbinas são conectadas pelo eixo de rotação aos geradores elétricos que desta forma produzem a eletricidade usada nos lares e indústrias através das hidrelétricas (PASTERNAK, 1998; ).

Depois surgiram diversas outras formas de gerar eletricidade, incluindo as turbinas a vapor com centrais nucleares a fissão, turbinas eólicas impulsionadas por ventos, turbinas aeronáuticas estacionárias, grandes motogeradores a diesel, entre diversas outras máquinas cuja função é produzir eletricidade. Entretanto, seja qual for o mecanismo de transformação da energia em energia elétrica, fato é que atualmente os seres humanos são vorazes consumidores de eletricidade (TRYGGESTAD, 2019).

O consumo de energia primária atual no mundo é de cerca de ~175 mil TWh ano de todos os tipos de energia disponíveis, desde os combustíveis fósseis as mais novas fontes de energia renováveis. Na Figura 1 é possível observar a relação da quantidade de energia consumida em 2019 para cada tipo de energia. Note que as energias fósseis ainda somam a maior parcela de energia cerca de ~75%-85%, no qual todo o resto incluem todas as fontes renováveis de energia ~30 mil TWh ano (nuclear, hidrelétrica, solar, eólica, biomassa, marés, entre outras).

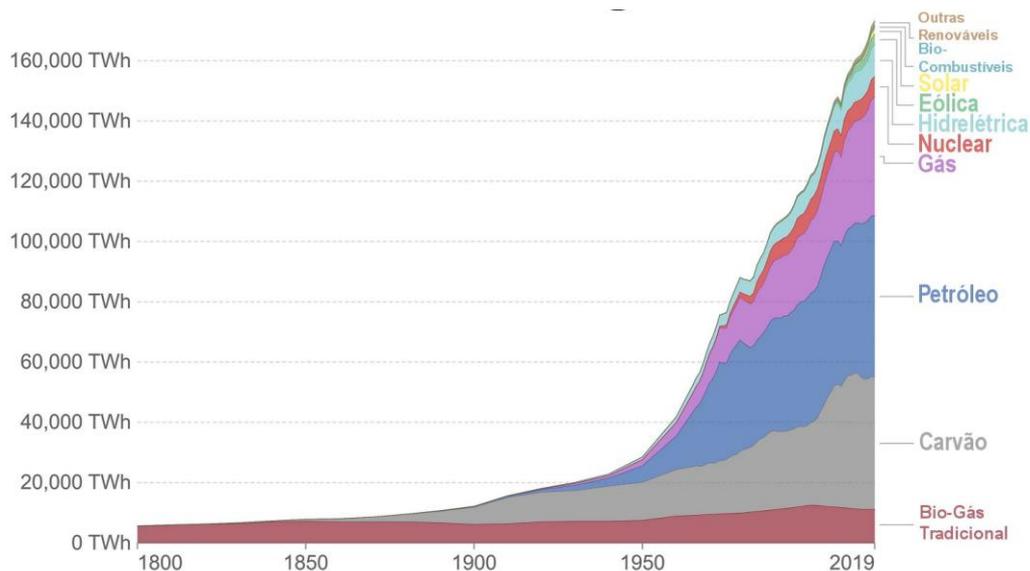


Figura 1 – Consumo primário de energia global no mundo no ano de 2019.

Fonte: Adaptado de Wiltgen (2021C).

O volume de energia produzida no mundo em 2020 na forma de eletricidade foi de ~26TWh. Essa quantidade de energia elétrica é uma insignificante fração da energia elétrica necessária para o futuro da humanidade. No futuro em 2100 a população mundial deverá ser de ~14 bilhões de pessoas. E a quantidade de déficit de energia elétrica esperada para 2100 será de mais do que o dobro da quantidade de energia produzida hoje.

Na Figura 2 é possível notar que os combustíveis fósseis ainda são mais de ~60% do total em produção de eletricidade. Espera-se que isso tenha uma pequena mudança relativa ao crescimento devido ao incentivo da energia elétrica renovável na Europa

relativo as sanções impostas aos combustíveis fósseis vindos da Rússia devido a deflagração da guerra contra a Ucrânia.

Essas mudanças geopolíticas podem impactar positivamente na composição da matriz energética mundial, principalmente ao que se refere a implementação das fontes de energias renováveis. Infelizmente a ineficiência na geração de energias eólica e fotovoltaica inerentes aos processos e a tecnologia atual ainda são um grande impedimento para que estas fontes de energia venham a somar significativamente na geração total de energia elétrica que o mundo demanda.

Entretanto, cabe dizer que toda e qualquer fonte de energia é importante para a diversificação da matriz energética mundial, assim sendo, estas novas fontes de energias devem sempre serem incentivadas para que possam ajudar na composição da eletricidade produzida no mundo.

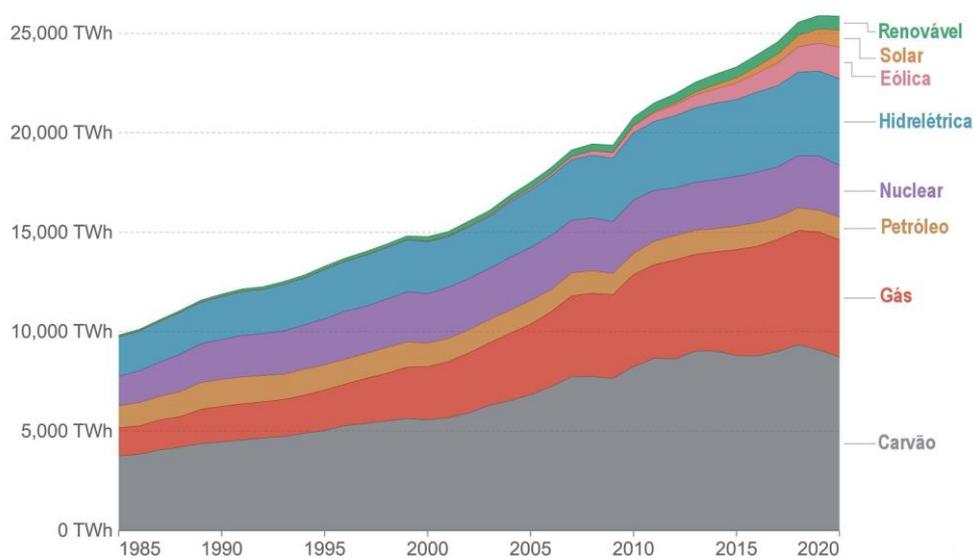


Figura 2 – Relação Produção total de energia elétrica por tipo de fonte do mundo no ano 2020.  
Fonte: Adaptado de Wiltgen (2022C).

No panorama brasileiro de 1985-2020 é possível notar que a composição da matriz energética elétrica do país, sempre contou com uma grande parcela da energia elétrica do tipo hidrelétrica, conforme pode ser observado na Figura 3. Em 1985 a fonte hidrelétrica era cerca de ~90%-95% do total de energia elétrica produzida no país, e em 2020 a fonte hidrelétrica foi de ~70% (~392 TW/h) do total produzido de ~606 TW/h no Brasil.

Nesse aspecto o Brasil fica completamente dependente das condições climáticas adversas devido as modificações que o planeta vem passando ao longo dos últimos anos. Uma grande estiagem de chuvas pode colocar o país em grandes problemas energéticos similares as que ocorreram a duas décadas.

O Brasil perdeu (últimos 30 anos) ~16% de sua superfície de água, o que representa uma área equivalente a ~3 milhões de hectares. Em 1991 esta área era de ~20 milhões de hectares, a redução equivale a uma vez e meia toda região do Nordeste Brasileiro. Aparentemente isso não tem mudado nos últimos anos. Essa redução hídrica afetará significativamente o Brasil na produção de energia elétrica se a matriz não for

diversificada a tempo. Isso é importante para o Brasil, e também, para outros países com forte dependência de recursos hídricos.

A composição de uma matriz energética diversificada permite uma grande robustez na produção de energia dado a uma maior imunidade as diversas mudanças que ocorrem com o clima mundial atualmente. Dentre as fontes de energia mais independentes do “humor” da natureza tem-se as fontes de energia nucleares (MURRAY, 1993). Não apenas pelo fato de que o combustível nuclear é de longa duração, mas também porque a produção é baseada no enriquecimento de recursos naturais explorados na forma de minérios quando na fissão nuclear, e na forma de separação de isótopos quando na fusão nuclear. Seja qual for a energia nuclear, sua independência do clima é uma enorme vantagem estratégica para a produção contínua de eletricidade.

### PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE POR FONTES DE ENERGIA BRASIL (1985-2020)

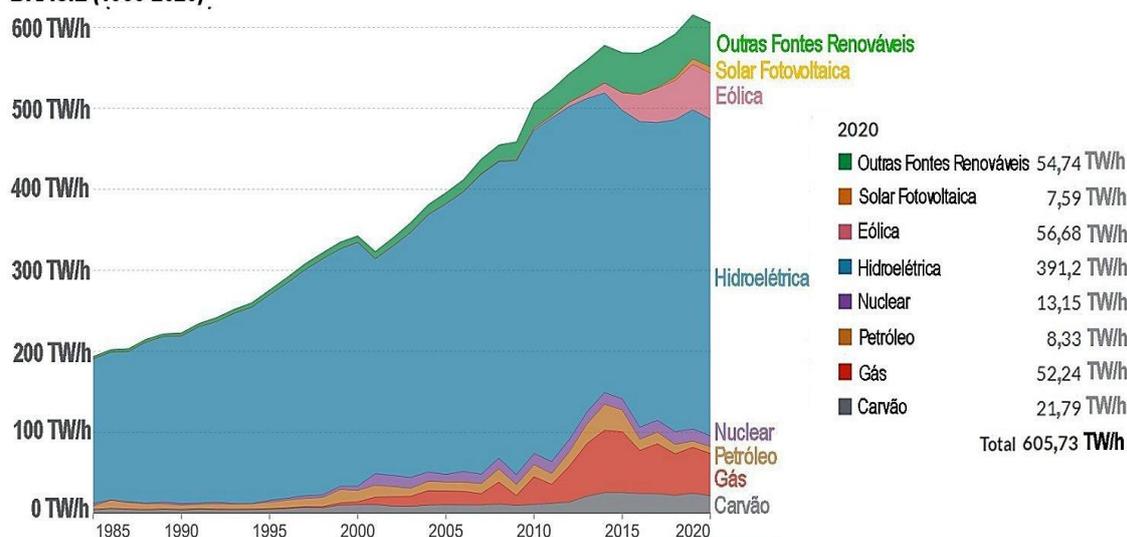


Figura 3 – Relação Produção total de energia elétrica no Brasil no ano 2020.  
Fonte: Adaptado de Wiltgen (2022C).

As pesquisas atuais mostram que os esforços empreendidos desde 1930 na fusão nuclear com confinamento magnético do plasma começam a sedimentar seus resultados com a construção da máquina Tokamak chamada *ITER* (*International Thermonuclear Experimental Reactor* - [www.iter.org](http://www.iter.org)) no interior da França, prevista para ter início de operações em 2025 (McLEAN, 2002; McCracken and Stott, 2012).

A fusão nuclear utilizando o Tokamak parece ser uma das iniciativas mais promissoras para obter um reator a fusão nuclear que possa ser comercializado até 2100, e assim permitir, que a energia nuclear a fusão possa compor a matriz energética mundial de forma significativa, e com um montante muito maior de produção de energia elétrica do que todas as outras fontes de energia juntas (LABERG, 2017; DEAN *et al.*, 1998).

Na continuidade do artigo tem-se a apresentação da energia a fusão nuclear e suas particularidades, assim como as características construtivas e operacionais de um Tokamak destinado a experimentações para um futuro reator a fusão nuclear.

### 3. Fusão Nuclear a Esperança de um Futuro Energético

A solução encontrada pela natureza para produzir grandes quantidades de energia para o Cosmo foi a fusão nuclear, o processo utilizado por todas as estrelas que sem dúvida é muito eficiente, e também, é um enorme desafio para muitas gerações de cientistas pesquisadores por todo o mundo, que desde 1930, quando surgiram as primeiras tentativas de construir máquinas para conseguir a fusão nuclear, dedicando-se a incansáveis ideias e aparatos científicos complexos para tornar viável a fusão nuclear.

A reação de fusão nuclear ocorre quando dois átomos leves vencem a barreira eletrostática de Coulomb e se fundem em uma nova partícula cuja a soma das massas antes da fusão é menor do que após a fusão. Assim sendo parte da massa se transforma em energia, e também, ocorre a liberação de nêutrons energéticos. Em uma reação de fusão nuclear do tipo Deutério (*D*) e Trítio (*T*), ambos isótopos do hidrogênio, tem-se a formação do Hélio (*He*), liberação de um nêutron energético e energia, conforme pode ser apreciado na Figura 4 no qual tem-se a reação de fusão nuclear (WILTGEN, 1998).

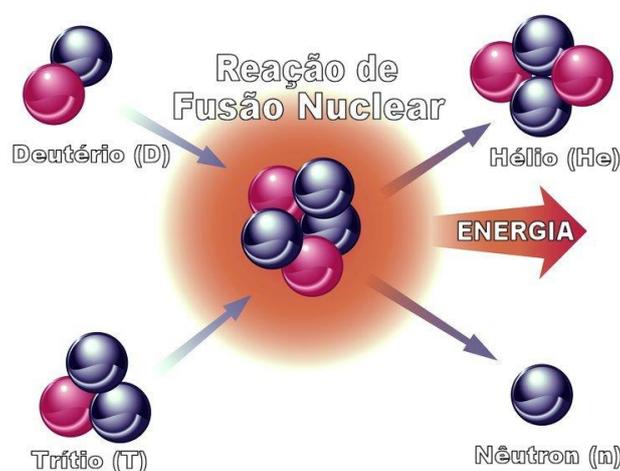


Figura 4 – Reação de Fusão Nuclear do Deutério com o Trítio.

Fonte: Wiltgen (2022B).

Entretanto, a reação de fusão nuclear na Terra necessita de uma elevada temperatura (~100 milhões de graus célsius), capaz de permitir que os dois átomos leves estejam tão agitados, ou seja, com tanta energia térmica que se tornam capazes de se colidir e romper a barreira de Coulomb gerando a fusão nuclear. O ambiente para que isso ocorra é o estado físico da matéria chamado plasma (WILTGEN, 2022A). No plasma a elevadas temperaturas os isótopos do hidrogênio (*D-T*) podem se colidir e realizar o processo de fusão nuclear. Devido a temperaturas tão elevadas do plasma, é necessário a utilização de uma máquina que utilize fortes campos magnéticos para conter (confinar) e produzir o plasma dentro de uma câmara de vácuo. A máquina mais propícia para isso tem sido o Tokamak (ARTISIMOVICH, 1972; FURTH, 1975; WILTGEN, 2021).

O Tokamak é um dispositivo experimental que vem sendo aperfeiçoado a ~80 anos em pesquisas científicas para a fusão nuclear. Atualmente o modelo de Tokamak mais promissor para obter a fusão nuclear é uma máquina no qual a secção transversal da coluna de plasma tem o formato geométrico parecido com um “D”, os quais são chamados de Tokamak esféricos, como pode ser visto na Figura 5 (COSTLEY, 2019).

A origem desta máquina é russa, cujo significado do acrônimo Tokamak em Cirílico (língua russa) é "*Тороидальная Камера С Магнитными Катушками*", ou seja, Câmara Toroidal com Bobinas Magnéticas. O Tokamak foi inventado no final da

década de 1950 pelos pesquisadores soviéticos *Igor Tamm*, *Andrei Sakharov* e *Natan Yavlinsky* inspirados pelo *Prof. Oleg Lavrent'ev*. O T-1 foi construído e testado no Instituto *Kurchatov* em Moscou em 1958 (WILTGEN, 2022B; EL-GUEBALY, 2010).

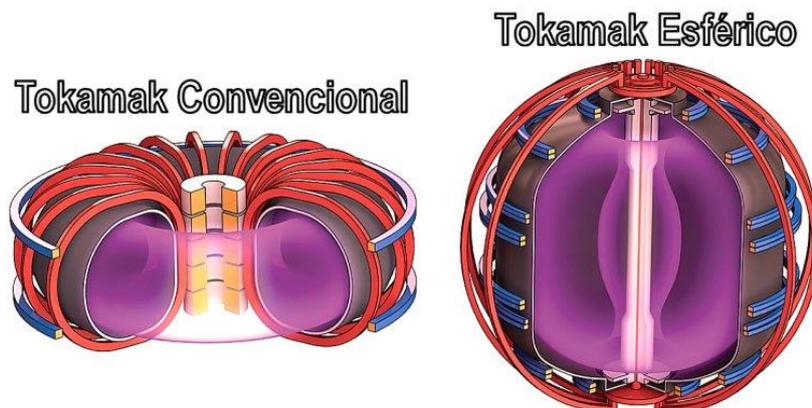


Figura 5 – Tipos de Tokamak – Convencional (secção circular) e Esférico (secção em formato D).  
Fonte: *Wiltgen* (2022E).

A física de plasmas (BOYLE, 1968; BELLAN, 2008; BOYD and SANDERSON, 2003; CHEN, 1974; ELIEZER and ELIEZER, 1989; GOLDSTON and RUTHERFORD, 1995) define de forma restritiva a operação de um Tokamak, não só no aspecto físico operacional, mas também com relação a seu tamanho e forma geométrica o que inclui atender aos parâmetros definidos pelo Critério de *Lawson*, que definem o tempo mínimo de confinamento do plasma, sua temperatura e sua densidade (LAWSON, 1957; COSTLEY, 2016; WILTGEN, 1998).

Um Tokamak funciona a partir da composição de campos magnéticos que formam um laço magnético helicoidal ao redor da coluna de plasma devido as correntes elétricas que circulam nas bobinas (Toroidal – cor amarela e Poloidal – cor azul) e na formação do plasma ocorre devido a uma bobina chamada de Solenoide Central (transformador de aquecimento ôhmico – cor dourada) que permite aquecer o gás no interior da câmara de vácuo e dar ignição ao plasma, formando a coluna de plasma toroidal (cor rosa) como pode ser visto na Figura 6 (WILTGEN, 2022C; WILTWALKER *et al.* 2020).

O funcionamento do Tokamak ocorre de forma pulsada e não contínua, assim sendo o plasma que se forma no interior da câmara de vácuo ocorre a cada disparo de energia na formação e confinamento do plasma (WILTGEN *et al.*, 2001; WILTGEN, 2018).

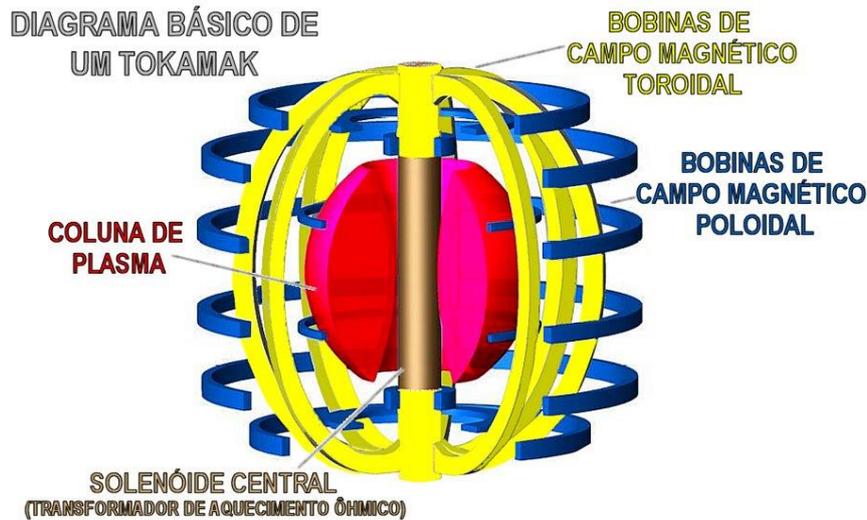


Figura 6 – Diagrama básico de um Tokamak esférico com seus principais componentes. Fonte: Wiltgen (2022C).

O confinamento magnético do plasma em um Tokamak permite sustentar a coluna de plasma no interior da câmara de vácuo a altas temperaturas sem que a mesma danifique a máquina (CONN, 1983; ONGENA *et al.*, 2016; WILTGEN *et al.*, 2001).

Na Figura 7 pode ser visto um Tokamak compacto do tipo esférico, no qual podem ser identificadas as partes principais, tais como bobinas magnéticas, câmara de vácuo estruturas de suporte e a relação do tamanho da máquina perto de pessoas. Também consta na figura uma foto da coluna de plasma no Tokamak esférico MAST. Além da composição de campo magnético helicoidal (imagem a direita no canto superior) e a relação de razão de aspecto da coluna de plasma (cor rosa mostrando as colunas convencional e esférica) e por fim, as linhas de campo magnético que dão a forma geométrica para um plasma esférico (canto inferior direito) (WILTGEN, 2022B).

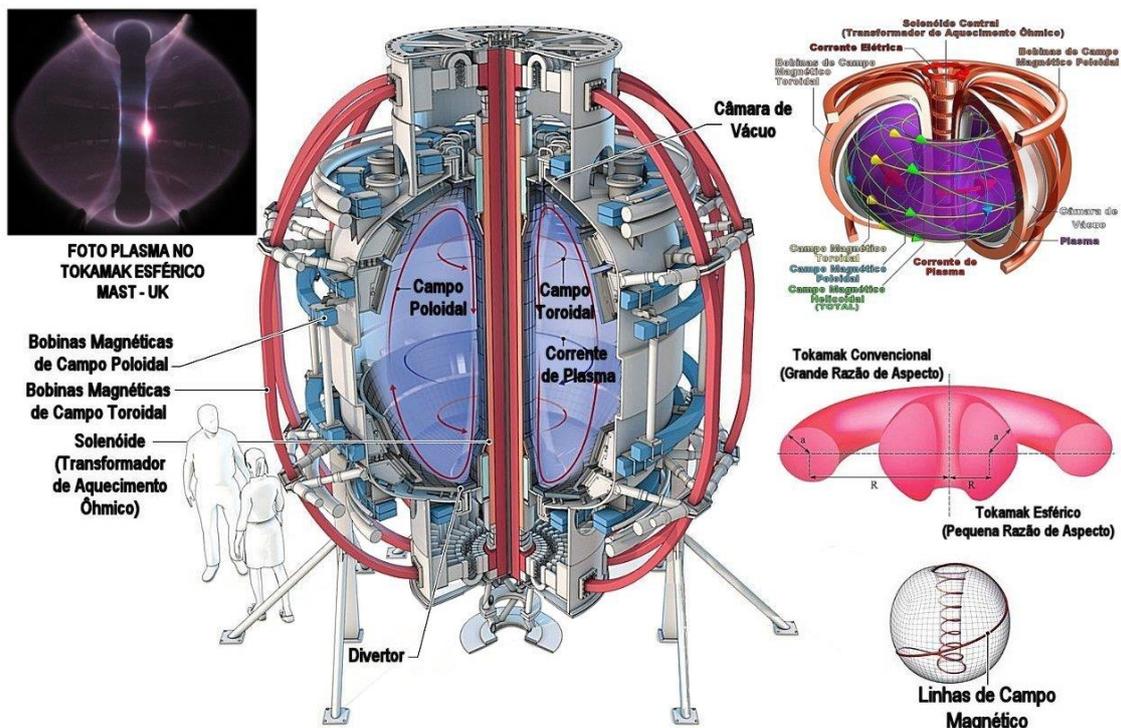


Figura 7 – Características de uma máquina do tipo Tokamak Esférico Compacto (pequena razão de aspecto). Fonte: Adaptado de Wiltgen (2022B).

A máquina Tokamak vem sendo testada e aperfeiçoada a muitas décadas com o intuito de um dia conseguir alcançar o ponto de ignição. O ponto de ignição é o momento em que um experimento de fusão nuclear produz mais energia por fusão nuclear do que o total de energia elétrica que foi consumida para realizar o processo de fusão nuclear. Nesse momento um experimento Tokamak, passa a ser um reator Tokamak.

As pesquisas neste exato momento, aguardam a finalização da construção do experimento Tokamak *ITER* para 2025, com um longo caminho para sua transformação no reator a fusão nuclear *ITER* em 2050. Com o esperado sucesso do primeiro reator a fusão nuclear no mundo, deverá ocorrer um processo de engenharia de fusão nuclear muito intenso no qual as pesquisas deverão gerar os requisitos de engenharia necessários para a fabricação dos futuros reatores a fusão nuclear no mundo chamados de *DEMO* (Reatores a Fusão Nuclear Demonstrativos) até 2100, quando começaram a ser produzidas e comercializadas as Centrais Nucleares a Fusão (*FPP – Fusion Power Plants*) dando início a uma nova era energética no mundo (BUTTERY *et al.*, 2021).

#### 4. Futuros Reatores a Fusão Nuclear com Tokamak

Para que os futuros reatores a fusão nuclear possam fornecer sua enorme eficiência termodinâmica de forma a ser convertida em eletricidade, é necessário construir toda uma infraestrutura específica para o reator, desde sistemas de apoio auxiliares a reação de fusão nuclear propriamente dita, aos sistemas de trocadores de calor, e turbinas a vapor preparadas para acionarem os geradores de energia elétrica (HANDLEY *et al.*, 2021; HAMACHER and BRADSHAW, 2001; HERMAN, 1990; ZOHM, 2019).

Os combustíveis Deutério-Trítio (*D-T*) são produzidos e armazenados localmente no próprio reator. O Trítio (*T*) é produzido a partir do cobertor de Lítio (*Li*) no interior do reator, e extraído para ser misturado ao Deutério (*D*) e reinjetado para uma nova reação de fusão nuclear, como He pode ser visto na Figura 8 (lado esquerdo combustível *D-T*).

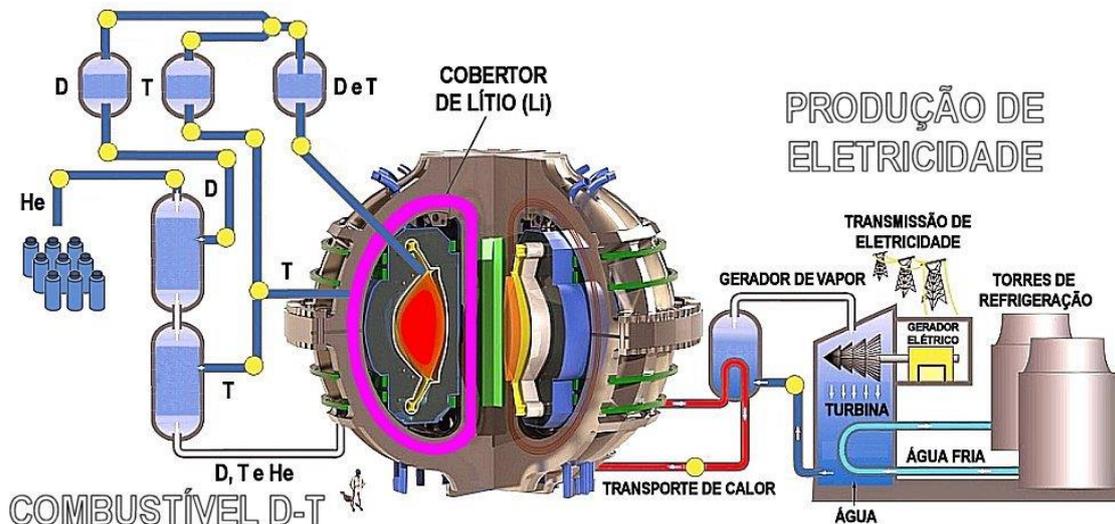


Figura 8 – Funcionamento de uma máquina Tokamak esférico compacto como um reator.

Fonte: Adaptado de Wiltgen (2022E).

Na Figura 8 é possível observar o funcionamento de um reator a fusão nuclear baseado em um Tokamak esférico compacto para um futuro distante. A expectativa real é que os primeiros reatores a fusão tenham tamanhos grandes como o *ITER*, ou ainda maiores (EL-GUABALY, 2009; GALAMBOS *et al.*, 1995; YUSHMANOV *et al.*, 1990).

Observe na Figura 9 que a eficiência de um reator a fusão nuclear é realmente muito discrepante das outras fontes de geração de energia elétrica, sendo capaz de produzir 1GW com apenas 0,5t de *D-T*. A segunda fonte de geração mais eficiente, a fissão nuclear, são necessárias ~150t de combustível nuclear (Plutônio ou Urânio).



Figura 9 – Comparativo das eficiências dos combustíveis utilizados para gerar 1GW de eletricidade. Fonte: Adaptado de Wiltgen (2021).

Observa-se que o tamanho das máquinas para a fusão termonuclear controlada tem crescido a cada nova geração de exploração para a obtenção de um reator. Isso tem relação direta com a superfície e o volume da coluna de plasma para o processo de fusão nuclear (CHEN, 2011; WILTGEN 2022C).

Na Figura 10 é possível observar este aumento no tamanho das máquinas Tokamak. Note que a coluna de plasma no *JET* (1984) possuía ~100m<sup>3</sup> o *ITER* (2025) deve possuir ~840m<sup>3</sup> (~8 vezes maior que o *JET*) e para o *DEMO* (2050) deve ser entre 1.000 e 3.500m<sup>3</sup> (até ~3,5 vezes maior que o *ITER*). Pouca diferença no volume de plasma deve existir entre o *DEMO* e o *FPP* (Central de Fusão Nuclear – *Fusion Power Plant*).

Em 2100 com a construção da primeira Central Nuclear a Fusão comercial, diversas serão as empresas a participar do desenvolvimento destes novos produtos, os quais terão muitos avanços e diferenciais competitivos, e quem sabe até a redução de tamanhos físicos, proporcionando uma maior versatilidade nos custos e prazos de instalação.

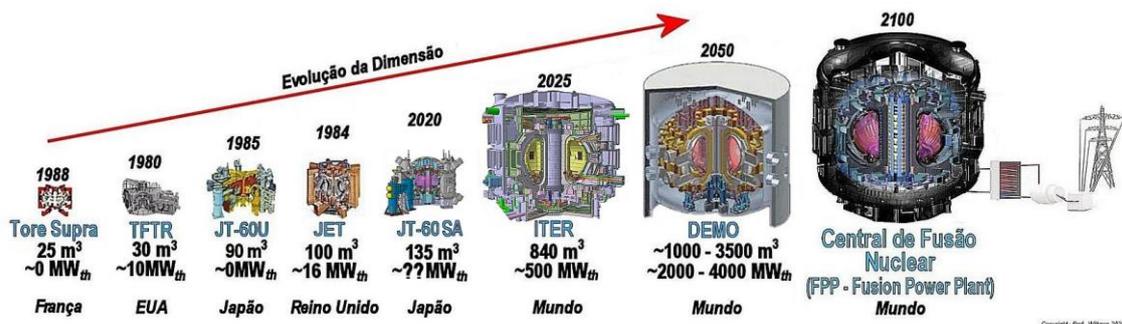


Figura 10 – Caminho da fusão termonuclear por confinamento magnético do plasma em máquinas do tipo Tokamak. Fonte: Wiltgen (2022B).

### 5. Perspectivas da Fusão Nuclear para o Futuro da Humanidade

A humanidade precisa avançar na sua imaturidade energética. Principal fator de conflitos e disputas econômicas as quais põe de lado o conceito de humanidade. O florescimento de uma nova forma de dispor de energia permite vislumbrar um futuro no qual um dia o equilíbrio seja finalmente alcançado, liberando os seres humanos para o real desenvolvimento das ciências, sem a preocupação com o amanhã energético.

O amanhã energético deve vir dos profundos segredos da Natureza e do Cosmos, os quais estão finalmente estão alvorecendo timidamente com os avanços da engenharia e da física de fusão termonuclear controlada por confinamento magnético do plasma em máquinas Tokamak. A energia de fusão nuclear deve passar a ser rotineira após 2100, com as primeiras centrais a fusão nuclear (*FPP*).

Espera-se uma nova era energética, no qual a abundância de recursos advindos da fartura de energia possibilite o entendimento e respeito pela Natureza e pela Humanidade. Tornando o convívio entre as nações e seus povos com uma profundidade ainda não presenciada no planeta.

A vida na Terra depende de um equilíbrio único no qual sem dúvida é responsabilidade da espécie humana. Isto não só com a preservação, mas também com as atitudes e exemplos a serem deixados para as futuras gerações humanas. Cabe a nossas gerações ter resiliência e compromisso com a atitude de mudar a forma de disponibilizar a energia elétrica para o mundo, tornando-o um lugar melhor e fértil para as ideias, inovações e imaginação sem limites.

### Referências

- ARTISIMOVICH, L.A.**, *Tokamak Devices*. Nuclear Fusion. v.12, pp.215-252, 1972.
- BELLAN, P.M.**, *Fundamentals of Plasma Physics*. Cambridge University Press, 2008. 628p.
- BOYD, J., SANDERSON, J.J.**, *The Physics of Plasmas*. Cambridge University Press, Cambridge, 2003. 548p.
- BOYLE, F.I.**, *Plasmas en el Laboratorio y en el Cosmos*. Reverté Mexicana, 1968. 175p.
- BUTTERY, R.J., PARK, J.M., MCCLENAGHAN, J.T., WEISBERG, D., CANIK, J., FERRON, J., GAROFALO, A., HOLCOMB, C.T., LEUER, J., SNYDER, P.B.**, *The Advanced Tokamak Path to a Compact Net Electric Fusion Pilot Plant*. Nuclear Fusion, v.61, pp.046028 (1-18), 2021.
- CHEN, F.F.**, *Plasma Physics and Controlled Fusion*. Plenum, New York, 1974. 440p.
- CHEN, F.F.**, *An Indispensable Truth: how Fusion Power can Save the Planet*. New York, Springer Science and Business Media, LLC. 2011. 450p.
- CONN, R.W.**, *The Engineering of Magnetic Fusion Reactors*. Scientific American, v.249(4), 1983.
- COSTLEY, A.E.**, *Towards a Compact Spherical Tokamak Fusion Pilot Plant*. Philos. Trans. R. Soc. A., v.377(2141), pp.20170439, 2019.
- COSTLEY, A.E.**, *On the Fusion Triple Product and Fusion Power Gain of Tokamak Pilot Plants and Reactors*. Nuclear Fusion, v.56, pp.066003 (1-8), 2016.
- DEAN, S.O., CALLEN, J.D., FURTH, H.P., CLARKE, J.F., OHKAWA, T., RUTHERFORD, P.H.**, *Status and Objectives of Tokamak Systems for Fusion Research*. Journal of Fusion Energy. v.17, pp.289-337, 1998.
- EL-GUEBALY, L.A.**, *History and Evolution of Fusion Power Plant Studies: Past, Present, and Future Prospects*. Nuclear Reactors, Nuclear Fusion and Fusion Engineering, NOVA Science Publishers. pp.217-271, 2009.
- EL-GUEBALY, L.A.**, *Fifty Years of Magnetic Fusion Research (1958–2008): Brief Historical Overview and Discussion of Future Trends*. Energies. v.3(6), pp.1067-1086, 2010.
- ELIEZER, Y., ELIEZER, S.**, *The Fourth State of Matter - An Introduction to the Physics of Plasma*. Bristol and Philadelphia, Adam Hilger, 1989. 226p.
- FURTH, H.P.**, *Tokamak Research*. Nuclear Fusion. v.15, pp.487-534, 1975.
- GALAMBOS, J.D., PERKINS, L.J., HANEY, S.W., MANDREKAS, J.**, *Commercial Tokamak Reactor Potential with Advanced Tokamak Operation*. Nuclear Fusion. v.35(5), pp.551-573, 1995.

- GOLDSTON, R.J., RUTHERFORD, P.H.**, *Introduction to Plasma Physics*. Bristol, 1995. 491p.
- HAMACHER, T, BRADSHAW, A.M.**, *Fusion as a Future Power Source: Recent Achievements and Prospectus*. 18th Congress World Energy Council, Buenos Aires, 21 to 25 October, pp.1-19, 2001.
- HANDLEY, M.C., SLESINSKI, D., HSU, S.C.**, *Potential Early Markets for Fusion Energy*. Journal of Fusion Energy. v.40(18), pp.1-17, 2021.
- HERMAN, R.**, *Fusion - The Search for Endless Energy*. University Cambridge, 1990. 280p.
- LABERG, M.**, *Alternative Approaches in Fusion. Presentation General Fusion*, Fusion Forum in Edmonton Alberta. November 4, pp.1-20, 2017.
- LAWSON, J.D.**, *Some Criteria for a Power Producing Thermonuclear Machine*. Proceedings of the Physical Society. B70, v.6, pp.6-10, 1957.
- McCRACKEN, G., STOTT, P.**, *Fusion: the Energy of the Universe*. Academic Press. 2012. 248p.
- McLEAN, A.**, *The ITER Fusion Reactor and its Role in Development of a Fusion Power Plant*. Canadian Nuclear Society Bulletin. v.23(02), pp.13-18, 2002.
- MOHAMMED, M., AKUOKO, M.**, *Subnational Variations in Electricity Access and Infant Mortality: Evidence from Ghana*. Health Policy Open 3, ScienceDirect. pp.1-12, 2022.
- MURRAY, R.L.**, *Nuclear Energy*. Pergamon Press, Oxford, 1993. 576p.
- ONGENA, J., KOCH, R., WOLF, R., ZOHN, H.**, *Magnetic-Confinement Fusion*. Nature Physics. v.12, pp.398-410, 2016.
- PASTERNAK, A.D.**, *Global Energy Futures and Human Development: A Framework for Analysis*. Lawrence Livermore National Laboratory (FR0202056). pp.1-5, 1998.
- SMITH, K.R., FRUMKIN, H., BALAKRISHNAN, K., BUTLER, C.D., CHAFE, Z.A., FAIRLIE, I., KINNEY, P., KJELLSTROM, T., MAUZERALL, D.L., MCKONE, T.E., MCMICHAEL, A.J., SCHNEIDER, M.**, *Energy and Human Health*. Annu. Rev. Public Health. v.34, pp.159-88, 2013.
- TRYGGESTAD, C.**, *Global Energy Perspective 2019: Reference Case*. Energy Insights McKinsey. pp.1-31, 2019.
- WALKER, L.M., DE VRIES, P., FELICI, F., SCUSTER, E.**, *Introduction to Tokamak Plasma Control*. American Control Conference. Denver, July 1-3. pp.1-18, 2020.
- WILTGEN, F.**, *Sistema Elétrico Pulsado com Controle Digital do Tokamak ETE (Experimento Tokamak Esférico)*. Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, 1998. 228p.
- WILTGEN, F., FERREIRA, J.G., LUDWIG, G.O., BOSCO, E.D., ROSSI, J.O.**, *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, 17-22 June. pp.1731-1734, 2001.
- 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. 372p.
- WILTGEN, F.**, *Energia Elétrica via Fusão Termonuclear Controlada*. Revista Militar de Ciência e Tecnologia (RMCT). v.38(03), pp.97-107, 2021.
- WILTGEN, F.**, *Estados Físicos da Matéria*. Revista Militar de Ciência e Tecnologia (RMCT). pp.1-9. Aguardando publicação, 2022A.
- WILTGEN, F.**, *Fusão Termonuclear Controlada por Confinamento Magnético do Plasma em Máquinas do Tipo Tokamak*. Revista Militar de Ciência e Tecnologia (RMCT). pp.1-6. Aguardando publicação, 2022B.

**WILTGEN, F.**, *The Pragmatic Dichotomy of Energy in the World*. Revista de Humanidade, Tecnologia e Cultura. pp.1-10. Aguardando publicação, 2022C.

**WILTGEN, F.**, *Futuro Reator a Fusão Nuclear do Tipo Tokamak – Máquina de Engenharia Desafiadora*. XI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM 2022. Teresina, 07-11 de agosto. pp.1-10. Aguardando publicação, 2022D.

**WILTGEN, F.**, *A Fusão Nuclear via Máquina do Tipo Tokamak – Energia Elétrica para o Futuro do Desenvolvimento Humano*. XIII Congresso Brasileiro de Planejamento Energético – CBPE 2022. Híbrido Remoto. pp.1-10. Aguardando publicação, 2022E.

**WILTGEN, F.**, *Futuro Reator a Fusão Nuclear do Tipo Tokamak – Máquina de Engenharia Desafiadora*. Engenharia: Construção de Conhecimentos, Editora Uniesmero. Aguardando publicação, 2022F. 10p.

**YUSHMANOV, P.N., TAKIZUKA, T., RIEDEL, K.S., KARDAUN, O.J., CORDEY, J.G., KAYE, S.M., POST, D.E.**, *Scalings for Tokamak Energy Confinement*. Nuclear Fusion. v.30, pp.1999-2006, 1990.

**ZOHM, H.**, *On the Size of Tokamak Fusion Power Plants*. Royal Society. A77, pp.1-9, 2019.