

CAMINHOS PARA O FUTURO DA ENERGIA

Filipe Wiltgen¹

Resumo

A humanidade está diretamente atrelada a disponibilidade de energia para o desenvolvimento contínuo. A futura escassez de recursos, incluindo a energia, deve ser um fator preponderante para a humanidade para as próximas três décadas. Dentre os recursos que a humanidade mais demanda, a energia figura como o principal, e sem dúvida é o alicerce da sociedade moderna. Se a energia vier a faltar, todo o resto que sustenta a sociedade inevitavelmente irá faltar. Encontrar caminhos eficientes para a sustentação do desenvolvimento humano não é fácil. Isso porque diversas soluções paliativas com eficiências medíocres deixam a sociedade com a falsa impressão de que não corre perigo de ficar sem energia, e isso realmente não é verdade. Sem uma fonte de energia constante, independente das “vontades” da natureza e imune as condições adversas, a sociedade ficará sem energia. Este artigo discute os verdadeiros caminhos para a futura da energia. Primeiramente mostrando a relação intrínseca e simbiótica da energia com a espécie humana, depois os tipos de energia existentes e seus reais potenciais para o desenvolvimento humano, por fim, as possíveis formas sustentáveis de produção de energia para as demandas atuais e futuras da humanidade. Como perspectivas futuras os caminhos possíveis para o futuro da energia de dos seres humanos.

Palavras-chave: Energia. Fusão nuclear. Fissão nuclear. Eletricidade. Tokamak.

PATHWAYS TO THE FUTURE OF ENERGY

Abstract

Humanity is directly linked to availability of energy for better socio-cultural-technological performance. The future scarcity of resources, including energy, should be a preponderant factor for humanity in the near future of three decades. Among the resources that humanity most demands, energy is main one, and without a doubt it is foundation of modern society. If energy fails, everything else that sustains society will inevitably fail. Finding efficient ways to sustain human development is not easy. This is because several palliative solutions with mediocre efficiency leave society with false impression that it is not in danger of running out of energy, and this is really not true. Without a constant source of energy, independent of the “wishes” of nature and immune to adverse conditions, society will run out of energy. This paper discusses true paths to the future of energy. Firstly, showing the intrinsic and symbiotic relationship between energy and the human species, then existing types of energy and their real potential for human development, finally, possible sustainable forms of energy production for current and future demands of humanity. As future prospects possible paths for the future of energy and human beings.

Keywords: Energy. Nuclear fusion. Nuclear fission. Electricity. Tokamak.

¹ Doutorado em Engenharia Eletrônica e Computação pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, docente na Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo – Centro Paula Souza – CPS - FATEC Pindamonhangaba (SP) e na FATEC Cruzeiro (SP). ORCID 0000-0002-2364-5157. E-mail: filipe.wiltgen@fatec.sp.gov.br

INTRODUÇÃO

O planeta sustenta uma abundância significativa de diferentes tipos de espécies vivas, de diferentes tamanhos, em diferentes ambientes, e com diferentes necessidades. Isso impõe as espécies uma condição de sobrevivência, não só com relação ao convívio entre as espécies, mas também com o próprio ambiente e com as condições vividas em cada tipo de clima.

O clima da Terra é dependente diretamente da radiação solar absorvida diariamente, e de forma diferente ao redor do planeta, dado a inclinação do eixo da Terra, assim como de sua própria rotação e translação no sistema solar. Fato é que isso impõe diferentes temperaturas em diferentes regiões, e estas diferenças de temperatura se traduzem nas estações climáticas em cada região do mundo.

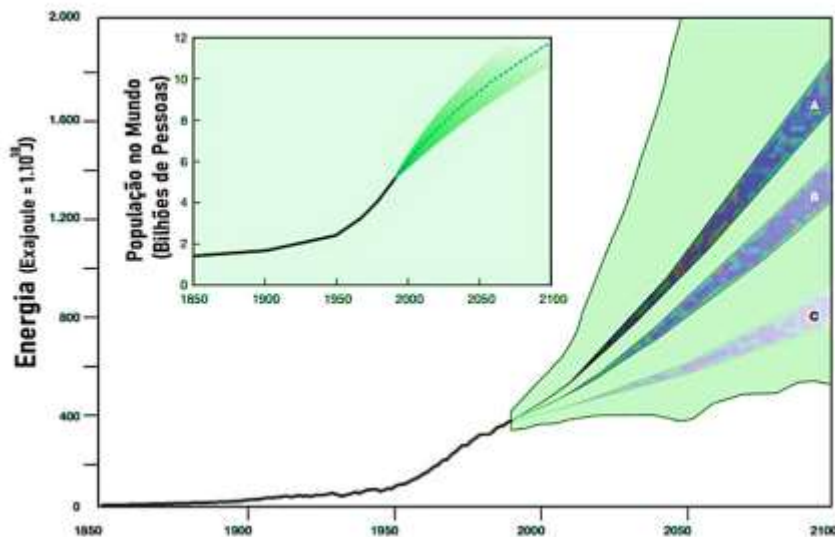
Estas mudanças no clima, podem ser entendidas como a principal questão relativa a compreensão da relação entre a energia, o ambiente e a saúde da vida humana deste planeta.

A espécie humana devido a suas características biológicas evolutivas, tornou-se extremamente dependente da energia, não só para a realização de tarefas do dia-a-dia, mas também, e principalmente para manter a saúde humana. Principalmente com relação ao aquecimento ou resfriamento do ambiente, assim como, na garantia alimentar com a conservação e a preparação de alimentos, tratamento de água, no condicionamento e produção de medicamentos, entre tantos outros que deixa muito clara a dependência e importância da energia para a vida humana e seu desenvolvimento.

Outro fator muito relevante para esta visão geral do cenário energético mundial é referente as escolhas das fontes de energia a serem utilizadas. Principalmente no tocante da sustentabilidade ambiental, eficiência e abundância, além de uma total independência dos fatores climáticos e ambientais.

A vida humana não pode ficar na dependência da “sorte” com o clima, as mudanças das estações do ano, as mudanças climáticas do planeta e as impostas pela presença dos humanos. Fato é que apesar de existirem ~8 bilhões de humanos no planeta (2022), nossa massa total é insignificante entre os seres vivos (~0,01%) o que mostra a fragilidade da vida. Muitos estudos mostram que a espécie deve estabilizar em ~10 bilhões de humanos no ano de 2100 (NAKCENOVIC, 2000). Os motivos para isso ocorrer podem ser diversos e não cabem nesta análise, mas cabe sim a expectativa quanto de energia deve ser demandada por esta quantidade de pessoas até o ano de 2100, conforme pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 – Quantidade de energia (1850-2100) e população no mesmo período, com três cenários possíveis (A – Elevado consumo de energia (~1.850 EJ), B – Médio consumo de energia (~1.450 EJ) e C – Baixo consumo de energia (~800EJ)).



Fonte: Adaptado de Nakcenovic (2000).

1.1 A Energia no Mundo

O planeta é muito vasto e possui uma grande abundância de espécies em diversos ambientes, cada ambiente permite a exploração de seus recursos naturais para a sobrevivência e a evolução de cada espécie, e com a espécie humana não foi diferente.

A exploração dos recursos do planeta permitiu o surgimento das sociedades e sua diversidade permitiu o comércio destes recursos entre diferentes países dada as diferenças de recursos existentes em cada território do planeta.

A necessidade energética surgiu com o aquecimento, cozimento de alimentos e a utilização do fogo. O combustível sólido vegetal de galhos secos permitiu que o fogo fosse utilizado tanto como defesa contra eventuais ataques de outras espécies na escuridão da noite quanto na preparação de alimentos mais ricos em proteínas.

Estes dois eventos percussores da utilização da energia térmica levaram a novas formas de obter calor através da queima de fluidos e sólidos de diferentes tipos. Destes os óleos de espécies animais como combustível devido a gordura, no qual a maior exploração foi das baleias para venda de óleo para iluminação pública, cuja a consequência levou a espécie a ser quase dizimada, até a descoberta e utilização dos chamados de combustíveis fósseis no século 19.

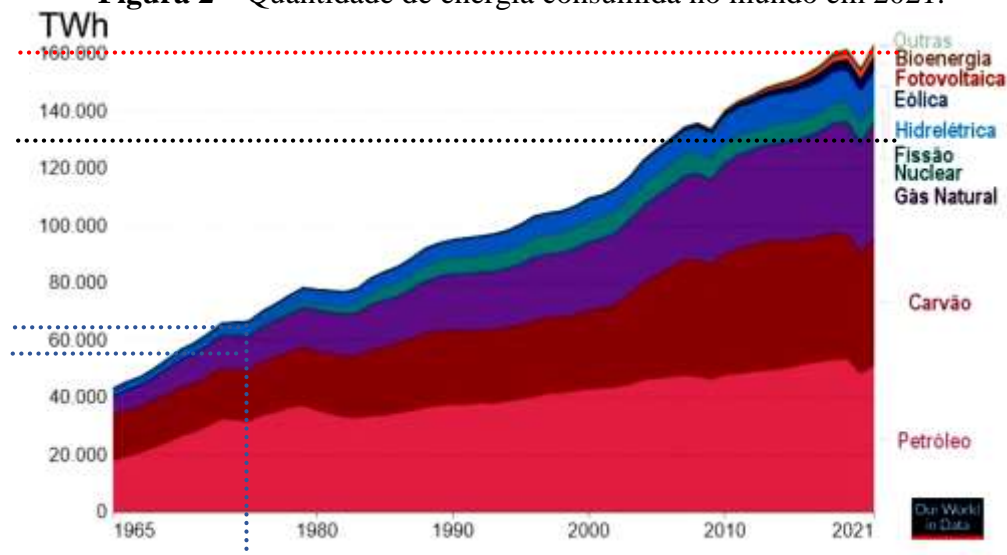
Estes combustíveis fósseis foram responsáveis pelos avanços tecnológicos dos humanos durante centenas de anos, e perduram até os dias atuais. Entretanto, atualmente é bem conhecido o custo de sua utilização por tanto tempo no ambiente do planeta. A substituição dos combustíveis fósseis é um fator relevante para o desenvolvimento humano. Isso teve início na fabricação dos diversos tipos de lâmpadas para a iluminação utilizando a eletricidade no final de 1870.

A substituição progressiva destes combustíveis fósseis pela eletricidade, depende muito mais da abundância da conversão da energia em eletricidade do que propriamente da tecnologia disponível, a qual existe a muito tempo.

É preciso entender que a substituição dos combustíveis fósseis na energia, precisam de um grande esforço mundial para o aumento da quantidade de energia elétrica disponível para suprir toda esta demanda de eletricidade.

Na Figura 2 fica claro o tamanho deste esforço energético (~87,5% combustíveis fósseis). Nesta figura (linha tracejada na cor vermelha) pode ser percebido que a quantidade de energia consumida no mundo em 2021 foi de ~160TWh (~160.000.000.000.000 Wh ∴ $160 \cdot 10^{12}$ Wh). Desta quantidade de energia apenas ~20TWh (~20.000.000.000.000 Wh ∴ $20 \cdot 10^{12}$ Wh), ou seja, cerca de ~12,5% é não fóssil (linha tracejada na cor preta).

Figura 2 – Quantidade de energia consumida no mundo em 2021.



Fonte: Adaptado de *Our World in Data* (2022).

Observe na figura que esta relação de ~87,5% de uso de combustíveis fósseis pela humanidade vem sendo mantida nesta proporção desde a década de 80 (linhas tracejadas na cor azul).

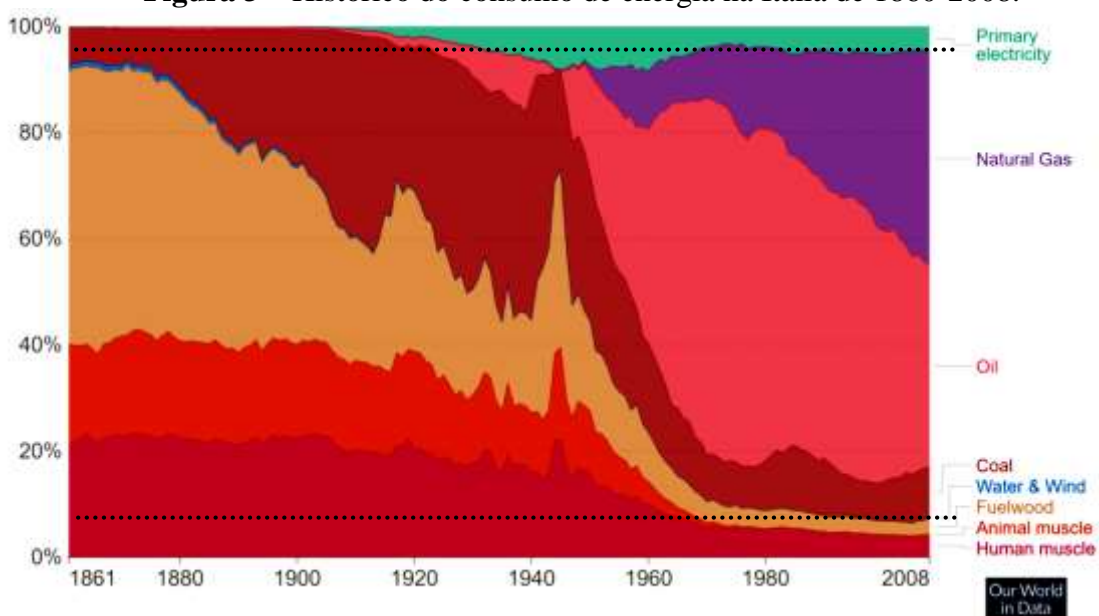
Ao observar o consumo histórico de energia na Itália (1860-2008) representado na Figura 3, fica nítido o volume de energia fóssil utilizada até o surgimento da eletricidade a partir de 1900 (~60% fóssil e ~40% animal e humana).

A partir de 1970 houve um maior aumento da energia elétrica em substituição a energia muscular humana (na cor rosa) e o término do emprego da energia muscular animal (cor laranja).

Em 2008 na Itália (Figura 3) a proporção de energia fóssil era de ~88% (linhas tracejadas na cor preta). Ou seja, muito próximo da proporção de hoje no mundo (conforme a Figura 3).

A grande questão é como substituir a fonte de energia fóssil atual, e fica pior quando se pensa no futuro, visto que os cenários previstos com o aumento da população parecem ser inalcançáveis.

Figura 3 – Histórico do consumo de energia na Itália de 1860-2008.



Fonte: Adaptado de *Our World in Data* (2022).

Todo o esforço para manter a vida moderna e a disponibilidade de energia parecem dificultar a substituição dos combustíveis fósseis facilmente. Entretanto, mesmo que os esforços não sejam satisfeitos para a mudança energética planejada, ou mesmo que os governos não queiram diminuir a demanda dos combustíveis fósseis, esta fonte de energia vai ficar cada vez mais rara de ser explorada e com custo significativamente maior, o que levará a uma grande instabilidade financeira no mundo no futuro que dará início a “crise energética severa”.

Isso tudo mostra que existe um problema grande no horizonte do desenvolvimento humano, que agora pode ser visto como distante, pessimista cerca de ~30 anos e otimista cerca

de ~80 anos, mas que infelizmente não existe uma solução viável a tempo de a civilização não sofrer com a escassez de energia severa.

A grande esperança é a fusão nuclear, mas mesmo ela só estará realmente disponível para uso quando a crise estiver ocorrendo. Isso se tudo ocorrer como o esperado no planejamento do desenvolvimento dos futuros reatores a fusão nuclear por confinamento magnético do plasma (três etapas, *ITER*, *DEMO* e *FPP* abordadas na continuação deste artigo). Acredita-se que este evento da “crise energética severa” deva ser, ao menos em parte, responsável por limitar o crescimento populacional a partir de ~2050 até ~2100.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

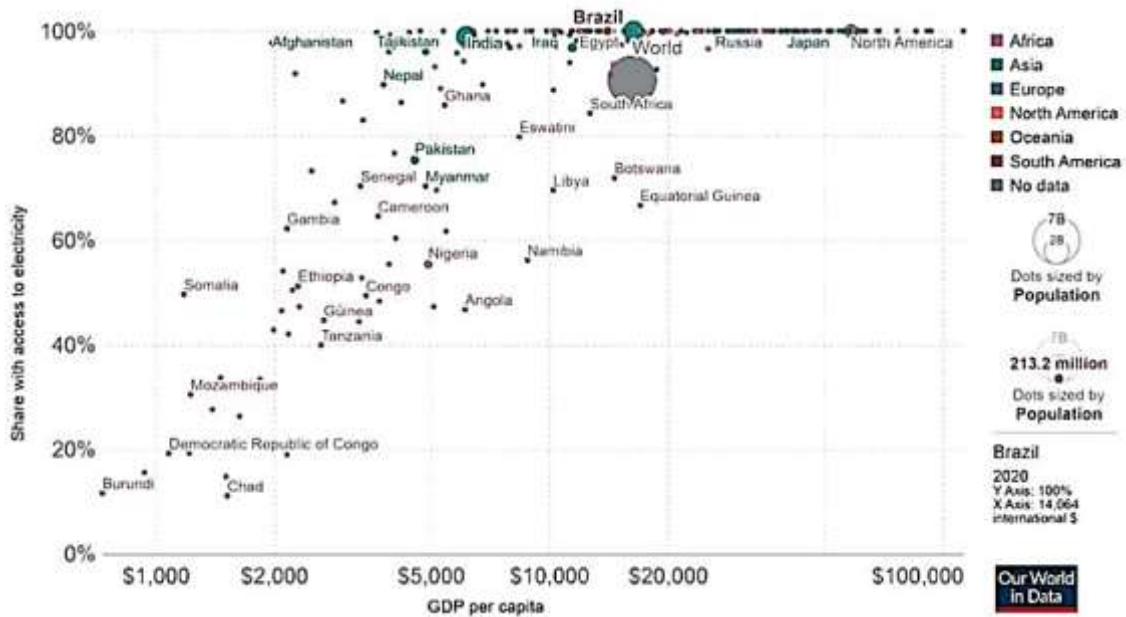
2.1 Panorama da Relação entre Energia, Ambiente e Saúde

A relativamente fácil perceber que existe uma forte relação entre a energia, o meio ambiente e a saúde humana (WHO, 2023; WEA, 2000; XIAO *et al.*, 2021; WILKINSON *et al.*, 2007; TRYGGESTAD, 2019; SMITH *et al.*, 2013).

Isto se mostra intrincado e bastante complicado quando se observa que a exploração do ambiente principalmente relativo para a produção de energia via *commodities* com a utilização de combustíveis fósseis, no qual além de perturbar o ambiente, seja pela extração ou pela queima. Sendo que a queima e a poluição do ar, leva a doenças e a morte por problemas respiratórios diversas pessoas, mais fortemente as que vivem nos grandes centros urbanos.

A falta de energia também leva a dificuldades e a mortes, principalmente para crianças recém-nascidas ou até aos cinco anos de idade. Isso é também um forte indicativo da renda per capita de uma nação (KIES *et al.*, 2021; HODGSON, 2005; HAINES *et al.*, 2007; PASTERNAK, 1998; LIU *et al.*, 2012; LIU *et al.*, 2022). Na Figura 4 é possível observar que diversos países com variada renda per capita (~2.000 dólares até mais de 100.000 dólares) estão entre 80 e 100% de acesso a sua população. Entretanto, abaixo de 80% de acesso à energia a grande maioria dos países tem renda per capita abaixo de ~20.000 dólares concentrada na África e na Ásia (SHOBANDE, 2020).

Figura 4 – Acesso à energia elétrica versus renda per capita no mundo em 2020.

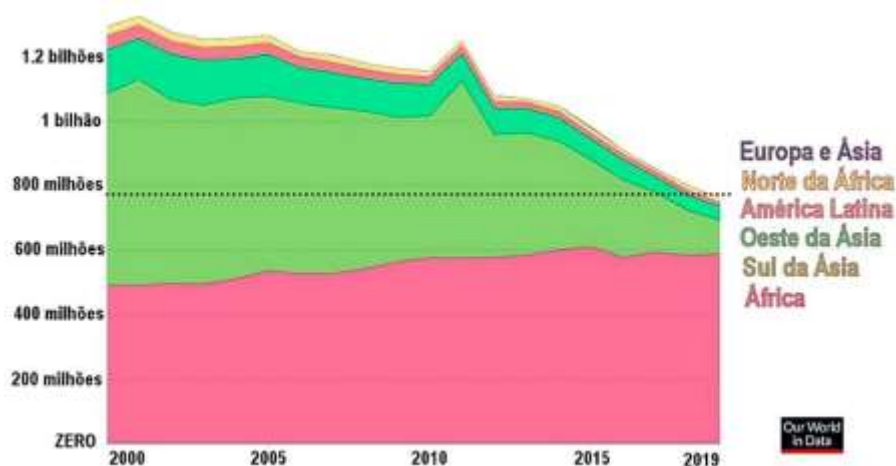


Fonte: Adaptado de *Our World in Data* (2022).

O país que tem a menor oferta de acesso à energia (menor que 20%) e o mesmo que tem a menor renda per capita (abaixo de 1.000 dólares) é Burundi que faz fronteira com a Ruanda na África (MOHAMMED e AKUOKO, 2022; FELTRIN, 2018).

Na Figura 5 tem-se a relação de quantidade de pessoas no mundo em 2019 sem acesso à energia elétrica. No ano 2000 eram mais de 1,2 bilhões de pessoas sem acesso à energia elétrica e no decorrer de quase uma década a quantidade de pessoas sem acesso reduziram cerca de ~40%, mesmo assim, são cerca de ~10% da população em 2019 o que equivale a cerca de ~800 milhões de pessoas (GREENSTONE *et al.*, 2019; FRIGO, 2018).

Figura 5 – Quantidade de pessoas no mundo sem acesso à energia elétrica 2019 (cerca de ~800 milhões de pessoas no mundo ∴ ~10% das pessoas no mundo).



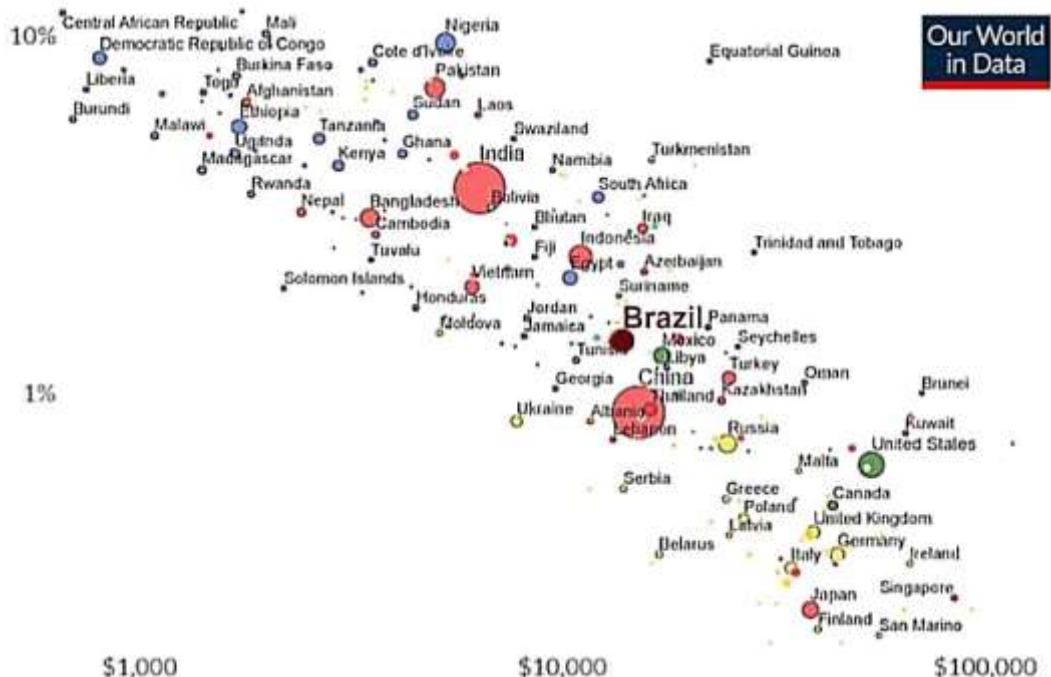
Fonte: Adaptado de *Our World in Data* (2022).

Na Figura 5 observa-se que a população da África e Ásia são as que mais sofrem com a falta de acesso à energia elétrica, o que equivale em 2019 cerca de ~95% de todas as pessoas no mundo sem acesso a eletricidade.

Esta falta de energia elétrica impacta diretamente na qualidade de vida, o que impacta na renda per capita, e assim, nas condições básicas de sobrevivência, na qualidade no tratamento de água e doenças relacionadas como principalmente a diarreia. O que também afeta na qualidade do tratamento médico hospitalar com modernos e caros equipamentos que permitem salvar vidas com rápidos diagnósticos. Tudo isso se soma a tentativa de sobrevivência dos mais frágeis que são as crianças e idosos, principalmente as crianças (HODGSON, 2010; BRUNEKREEF e HOLGATE, 2002). A falta de energia tem forte relacionamento com a mortalidade infantil no mundo (NETA *et al.*, 2022).

Na Figura 6 é possível ver a relação entre diversos países e a proporção de mortalidade infantil (0-10%) pela renda per capita (0-100.000 dólares). Como exemplo pode ser observado o Brasil na região central, cuja a mortalidade infantil está em torno de ~1,2% e ~14.000 dólares de renda per capita. Também podem ser observados os extremos, o primeiro é San Marino com o menor índice de mortalidade infantil (inferior a ~0,1%) e maior renda per capita (~90.000 dólares). O último com índice de mortalidade infantil superior a 10%, e renda per capita muito inferior a ~1.000 dólares, a República Central Africana.

Figura 6 – Mortalidade infantil (menores que 5 anos de idade) x Renda Per Capita em países no mundo no ano de 2017.



Fonte: Adaptado de *Our World in Data* (2022).

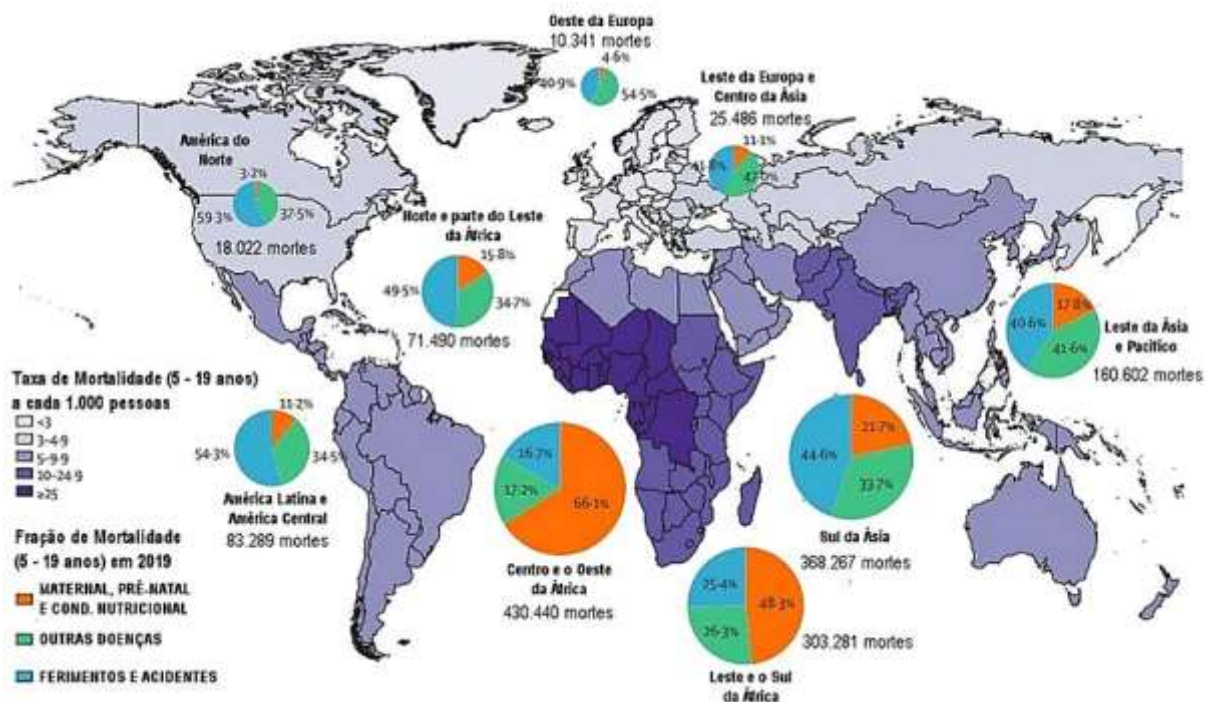
A mortalidade acima de 5 anos e abaixo de 19 anos de idade, também se mostra muito preocupante.

Na Figura 7 é possível observar a fração de mortalidade (5-19 anos) nas distintas regiões do mundo. Dentre as causas de mortalidade, tem-se na cor laranja, mortes maternas, pré-natal e nutricional, na cor verde tem-se diversas doenças, no qual a maioria é relacionada a doenças respiratórias (pneumonia) e na cor azul tem-se ferimentos e acidentes (PERIN *et al.*, 2022).

É preocupante a África no tocante as mortes na cor laranja, visto que grande parte destas mortes é devido à falta de recursos básicos entre estes a falta do acesso à energia elétrica (~16% leste, ~66% oeste e ~48% sul).

Nas américas prevalecem as mortes na cor azul relativo a acidentes e ferimentos o que não parece estar relacionado com o acesso à energia elétrica. Na Europa, Ásia e no Pacífico nota-se que existe uma tendência maior para as mortes na cor verde, o que indica doenças, podendo incluir a pneumonia, principalmente no hemisfério norte mais frio e pode ser um forte indicativo do acesso e do custo da energia utilizada para o aquecimento de residências.

Figura 7 – Mortalidade no mundo de 5 a 19 anos de idade em 2019.



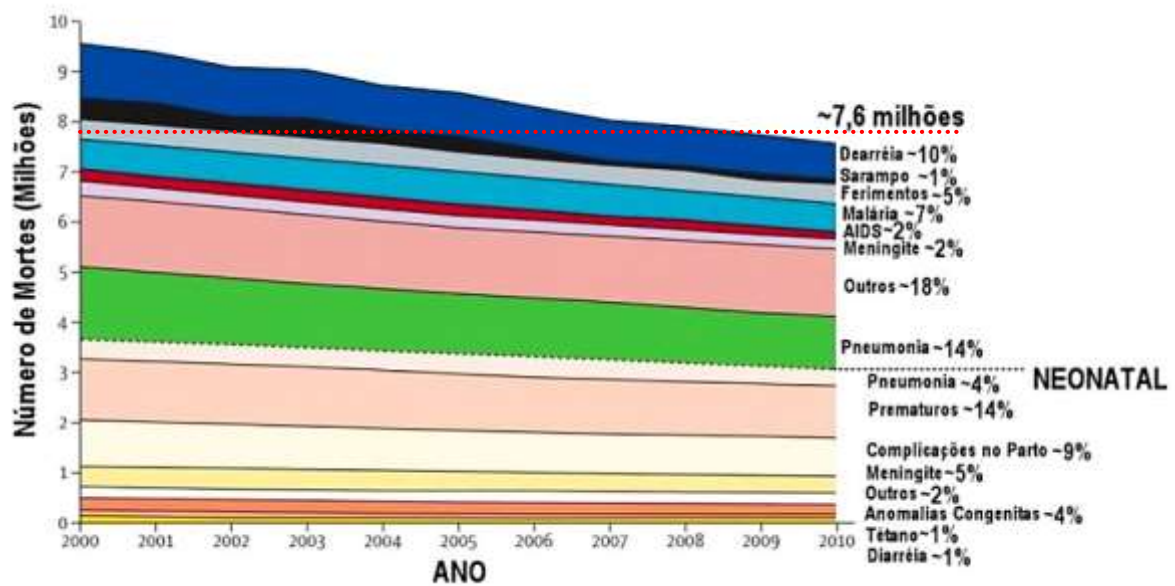
Fonte: Adaptado de Perin *et al.* (2022).

Dentre as causas de mortalidade infantil, nenhuma é relacionada diretamente a escassez ou a falta de energia elétrica. Entretanto, sabe-se que algumas doenças poderiam ser evitadas

de forma mais contundente com a melhoria nas condições básicas de saúde e moradia e atendimento médico-hospitalar que podem ser muito melhoradas com o acesso a eletricidade.

Na Figura 8 tem-se a quantidade de mortalidade infantil (2000 até 2010) e as principais causas destas mortes. Note que no ano 2000 eram cerca de ~9,5 milhões de mortes, e a pneumonia (~18% \therefore ~14% + ~4%) e a diarreia (~11% \therefore ~10% + ~1%) as principais causas, o que totaliza quase 30%. Note que esta proporção não muda significativamente em uma década. Em 2010, apesar de ter diminuído o número total da mortalidade infantil no mundo (~7,6 milhões linha tracejada na cor vermelha) a pneumonia e a diarreia ainda sendo as doenças que mais matam crianças. Ambas doenças de certa forma têm relação estreita com a falta de acesso a eletricidade, principalmente na África e Ásia, e isto pode estar contribuindo para estas mortes.

Figura 8 – Principais causas de mortalidade infantil (2000 a 2010).



Fonte: Adaptado de Liu *et al.* (2012).

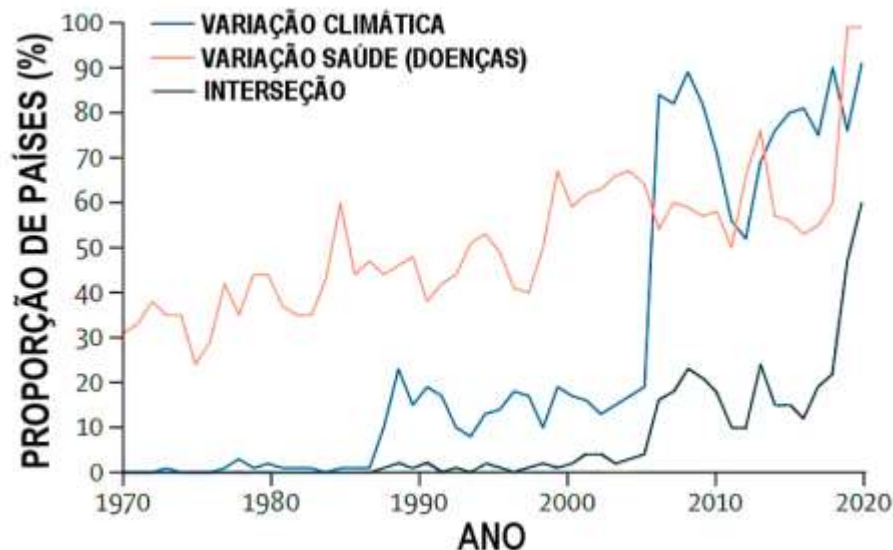
Fato é que a escolha da fonte de energia pode também prejudicar a saúde humana profundamente, dado que levantamentos históricos apontam para uma estranha correspondência do aumento de doenças nos humanos com a variação climática (LAVE e FREEBURG, 1975).

A poluição do ar confinada em determinadas regiões de grandes centros urbanos ocorre devido ao efeito da inversão térmica que aumenta a concentração e impede a dispersão de poluentes gerados pela queima excessiva de combustíveis fósseis. Este efeito leva a uma maior incidência de doenças respiratórias entre estas a pneumonia.

Na Figura 9 pode ser observado um estudo a longo prazo de 50 anos (1970-2020) que mostra a estranha correspondência da elevação das ocorrências de doenças entre os humanos (curva na cor vermelha) acompanhando as elevações nas mudanças do clima (curva na cor azul) o que fica mais visível é a curva de interseção (na cor preta).

Note que o índice de proporção de doenças em países tem início relacionado com o clima a partir do ano de 1985, logo após o início dos registros de mudança no clima, ficando cada vez mais evidente a partir de cada pico de mudança climática (1988-1989, 2004-2005 e 2017-2018), vindo a agravar o índice de porcentagem de doenças por países no ano de 2019-2020 (ROMANELLO *et al.* 2022; BURGESS *et al.*, 2020; AZAM *et al.*, 2019).

Figura 9 – Relação entre a variação climática e a ocorrência de doenças em proporção a países do mundo (1970-2020).



Fonte: Adaptado de Romanello *et al.* (2022).

Apesar dos esforços da comunidade científica para alertar e solicitar mudanças energéticas de suas fontes as nações pelo mundo, a pressão financeira e econômica, parece ser uma barreira intransponível e uma forte “miopia” confortável aos governantes, que levam ao pé da letra a máxima, “tudo o que não se vê, não existe!”.

2.2 Caminhos para as Fontes de Energia Prováveis no Futuro

Se a humanidade é dependente da energia para sua subsistência, então é premente que sejam escolhidas e exploradas as fontes de energia que menos impactam nas mudanças climáticas e na saúde humana e do planeta.

Encontrar as fontes de energia prováveis apesar de sugerir algo simples e fácil, realmente não é nem simples e muito menos fácil. A principal transformação energética é dada pela termodinâmica, ou seja, com o trânsito do calor.

Desde a primeira revolução industrial ficou clara a necessidade utilizar a termodinâmica para realizar as tarefas árduas, as quais antes eram de responsabilidade humana ou de animais domesticados. O vapor mudou a forma de conduzir tarefas e levou a construção de máquinas que convertiam o calor em energia mecânica.

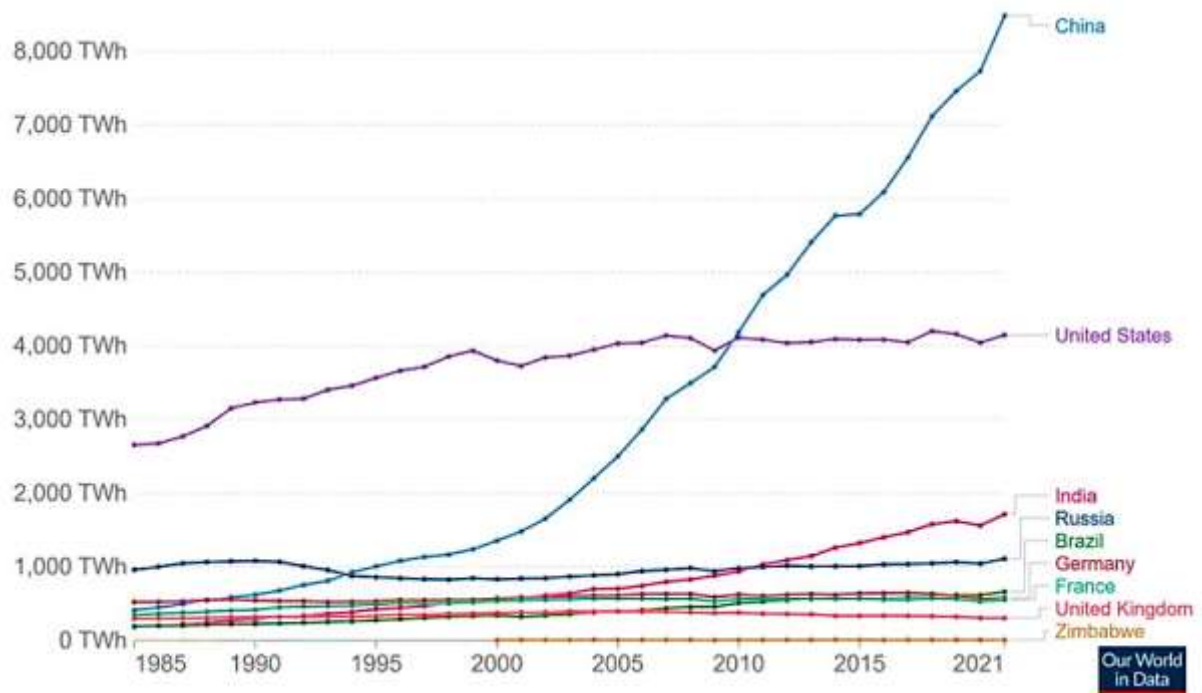
Não foi fácil, mas com o passar do tempo e as mudanças tecnológicas aliadas ao melhor entendimento e conhecimento do comportamento da eletricidade, permitiram que diversas máquinas elétricas fossem inventadas e aperfeiçoadas, de tal forma a tornar possível que o vapor (caldeira) fosse convertido em energia mecânica rotacional (turbina) interligada no mesmo eixo de uma máquina elétrica (gerador) transforma-se o calor em eletricidade (WILTGEN, 2018; WILTGEN, 2021; WILTGEN, 2022E).

A eletricidade é sem dúvida a fonte de energia humana mais importante, não só por sua versatilidade, armazenamento e eficiência, mas também pelo fato de que pode ser facilmente convertida em mecânica e térmica.

Encontrar formas de obter a eletricidade via novas fontes de energia motivam diversas pesquisas científicas, dentre as quais algumas se mostram essencialmente importantes para o futuro, como o caso da energia nuclear.

Na Figura 10 é possível observar a geração elétrica de alguns países no ano de 2021. Note que a China diferentemente de outros países tem investido significativamente me eletricidade partindo de ~500 TWh em 1985 para cerca de ~9.000 TWh em 2021 (aumento de ~94,5%). Apenas a Índia e EUA tiveram também um aumento na geração elétrica de 1985 a 2021. Cerca ~30% de aumento nos EUA (~2.800TWh para ~4.000TWh) e ~94,5% de aumento na Índia (~100TWh para ~1.800TWh).

Figura 10 – Geração de eletricidade comparação entre alguns países em 2021.



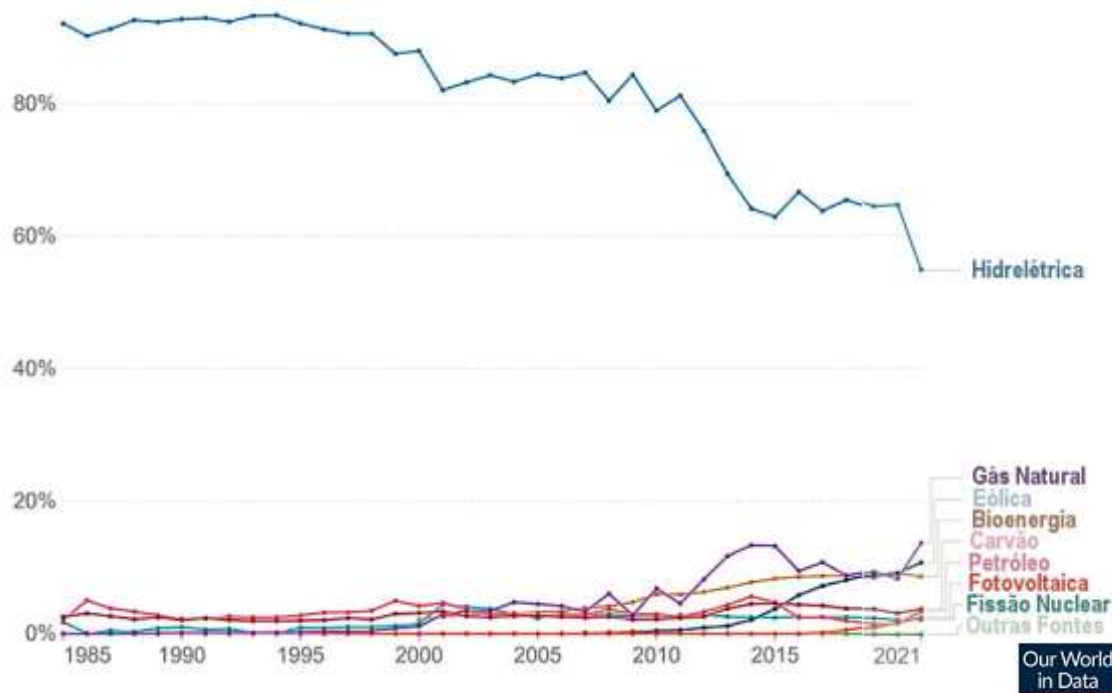
Fonte: Adaptado de *Our World in Data* (2022).

Na Figura 11 é mostrado um cenário atual da geração energética no Brasil distribuído pelos diversos tipos de fontes de energia vindo desde o ano de 1985 até o ano de 2021 (WILTGEN, 2023A; WILTGEN, 2023B).

Nesta figura é possível notar que a participação da energia hidrelétrica foi reduzida de ~95% (1985) para ~66% (2021), devido ao aumento na participação das fontes de energia como gás natural (~0 em 1985 a ~11% em 2021), eólica (~0 em 2006 a ~7% em 2021), fotovoltaica (~0 em 2015 a ~2,5% em 2021) e bioenergia (~0 em 1995 a ~8,5% em 2021). As outras fontes de energia ficaram relativamente estáveis.

O Brasil produz energia elétrica via fissão nuclear na central de Angra dos Reis, mas sua participação é pouco expressiva no contexto energético com cerca de ~2% (1985 até 2021, com pequenas variações na década de 90) o que é infelizmente inexpressivo para a matriz energética brasileira.

Figura 11 – Comparação entre as fontes de geração de eletricidade no Brasil (1985-2021).



Fonte: Adaptado de *Our World in Data* (2022).

A escolha das fontes de energia prováveis, leva a três caminhos muito distintos (WILTGEN, 2022A; WILTGEN, 2022B; WILTGEN, 2022C).

O primeiro caminho é insistir em utilizar as fontes renováveis fotovoltaicas e eólicas, mas com uma tecnologia disruptiva que possa permitir um aumento significativo na eficiência destas técnicas, e depois a redução de custo para que as mesmas possam ser empregadas em elevada escala, principalmente a fotovoltaica, no revestimento de paredes e telhados de residências, edifícios, e outros como em pavimentos de estradas e ruas.

O segundo caminho é incentivar o uso consciente e sustentável com muita segurança o uso da energia nuclear de fissão. Este caminho parece ser imprescindível para a redução da crise energética futura (WILTGEN, 2022D).

A utilização de micro centrais a fissão nuclear parece ser um caminho importante para que seja utilizado menos combustível nuclear, e possa ser melhor administrado sua capilaridade em uma matriz energética. Além é claro de que a utilização dos micro reatores a fissão, inviabiliza a grande quantidade de lixo radioativo gerado em uma grande central nuclear, assim como, sua utilização para artefatos bélicos nucleares (BOYLE, 1968; CHEN, 2011).

O terceiro caminho, a grande esperança da humanidade, é o sucesso com os futuros reatores a fusão nuclear. Este sem dúvida é o caminho mais aguardado. Entretanto, este caminho só terá êxito se o segundo caminho for implementado em conjunto com ele. E de fato, com um

olhar mais aprofundado da questão, parece que a solução real envolve a implementação conjunta dos três caminhos concomitantemente.

Isto dará o suporte necessário para manter a geração de energia, mesmo que precária até que comece a funcionar os reatores a fusão nuclear. Os reatores a fusão nuclear vão utilizar uma mistura de dois isótopos do hidrogênio que juntos são capazes de produzir uma grande quantidade de energia, esta mistura de isótopos é composta por Deutério (D) e Trítio (T). A eficiência desta mistura é algo impressionante. Na Figura 12 pode ser observada uma comparação entre o combustível da fusão nuclear com combustíveis fósseis (YICAN e SUMER, 2018; MISHRA e ANITHA, 2020).

Note que apenas 1kg da mistura de D-T na fusão nuclear equivale a impressionantes quantidades de combustível fóssil, quer seja de gás natural ($\sim 6 \cdot 10^6$ kg \therefore ~ 6 M kg), petróleo ($\sim 7,55 \cdot 10^6$ kg \therefore $\sim 7,55$ M kg) ou carvão mineral ($\sim 10 \cdot 10^6$ kg \therefore ~ 10 M kg) (McCRACKEN e STOTT, 2012; COSTLEY, 2019).

Figura 12 – Comparação da eficiência energética da fusão nuclear, a partir de reatores funcionando com a mistura de Deutério e Trítio (D-T) em uma garrafa de 1kg, e quanto isso equivale em combustíveis fósseis tradicionais (gás, óleo (petróleo) e carvão).



Fonte: Próprio Autor (2023).

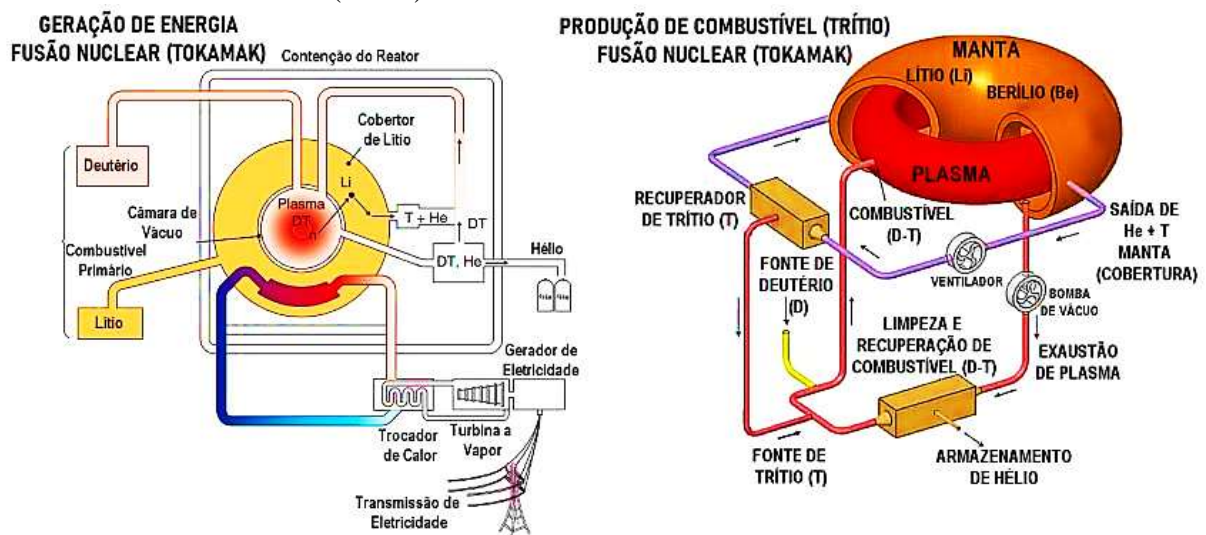
Dentre as máquinas mais promissoras para ser um futuro reator a fusão nuclear, o dispositivo Tokamak é o mais explorado cientificamente e por mais tempo. Sua evolução levou a construção de uma máquina com enormes proporções que estará pronta em 2025. Esta máquina é chamada de *ITER* (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) e sua construção segue em ritmo acelerado na França. A pesquisa com o *ITER* visa obter e entender como manter a fusão nuclear em um reator comercial no futuro (LACKNER, 2008; ARTISIMOVICH, 1972; BUTTERY *et al.*, 2021; CONN, 1983).

O funcionamento de Tokamak é simples no contexto teórico, mas é uma máquina muito complexa, dado que seu funcionamento depende de uma armadilha magnética que possa confinar o plasma (~ 150 milhões de $^{\circ}\text{C}$), por um longo período de tempo (alguns segundos),

com uma grande densidade da mistura D-T que permita a interação e a reação de fusão nuclear. Além disso, para que o Tokamak seja sustentável é preciso produzir o isótopo Trítio utilizado na reação via sua transformação do Lítio (Li) (HERMAN, 1990).

Na Figura 13 é possível ver tanto o processo de geração de energia via um Tokamak quanto a produção do combustível Trítio para a reação de fusão nuclear por confinamento magnético. No lado esquerdo da geração de energia é possível observar como ocorrerá a reação de fusão nuclear com a mistura D-T, e o aproveitamento do calor gerado e conduzido por sistemas trocadores de calor para a geração de eletricidade de forma tradicional. No lado direito da figura é possível observar a produção do Trítio (no cobertor de Lítio) e do Hélio subproduto da reação de fusão nuclear do D-T (HIWATAR e GOTO, 2019).

Figura 13 – Ciclo de geração de energia de fusão nuclear em Tokamaks e a produção de combustível (Trítio).

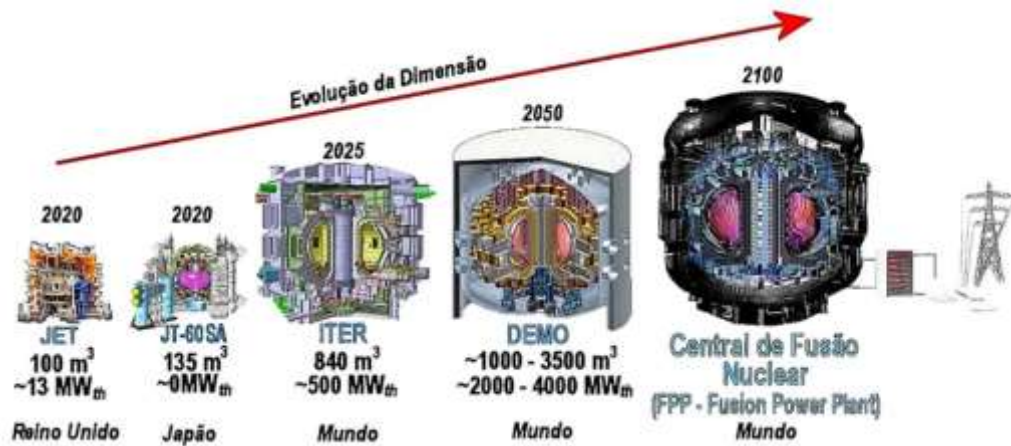


Fonte: Próprio Autor (2023).

Em um Tokamak do tamanho do *ITER* será possível sustentar a fusão nuclear para obter um reator factível comercialmente no futuro. A maturidade tecnológica terá alcançado *TRL 7-8* a caminho do Tokamak *DEMO* (*Demonstrative Reactor*) com *TRL 8-9* (~2050), e por fim, o Tokamak chamado *FPP* (*Fusion Power Plant*) o primeiro reator a fusão nuclear comercial (~2100).

Na Figura 14 é possível ver uma sequência evolutiva de dispositivos Tokamaks de 2020 até 2100. Nota-se facilmente o aumento do tamanho físico de cada uma destas máquinas aproximando-as cada vez mais da obtenção das condições ideais para obtenção da fusão nuclear como fonte de energia do futuro (HANDLEY *et al.*, 2021; GALAMBOS *et al.*, 1995; EL-GUEBALY, 2009).

Figura 14 – Evolução dos Tokamaks para um futuro reator a fusão nuclear por confinamento magnético do plasma (2020-2100).



Fonte: Próprio Autor (2023).

Pode ser possível que o funcionamento do primeiro reator a fusão nuclear possa abrir caminho para uma solução definitiva para mudar a precariedade na produção de energia da humanidade. Evitando as crises energéticas, melhorando a relação com o ambiente, evitando doenças e melhorando a qualidade de vida e saúde humana.

Desta forma, trazer a tão esperada estabilidade que o mundo tanto precisa e aspira para evoluir, e assim, permitir que os humanos se preocupem com assuntos muito mais importantes para a sociedade e a convivência humana.

CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS

O futuro é dinâmico, muda a cada momento conforme as decisões que são tomadas, quer sejam no sentido de melhorar a forma de obter energia, quer sejam nas escolhas da sociedade. O cenário energético mundial e a relação entre a energia, ambiente e a saúde são muito importantes para o futuro.

Fato é que encontrar uma possível solução para a escassez de energia deve ser algo pensado e planejado hoje, para que dê tempo de reação para as futuras gerações. Uma criança que nasceu em janeiro de 2023, terá cerca de ~80 anos de idade quando o primeiro reator comercial a fusão nuclear estiver em pleno funcionamento (~2100), e pode também, vir a testemunhar o resquício das reservas naturais de combustíveis fósseis, e com sorte, não presenciar a crise energética que se espreita.

Isto sem dúvida mostra a importância das decisões a serem tomadas agora, pois irão impactar fatalmente em nossos netos e bisnetos, e provavelmente nos filhos de cada um deles.

Seja qual for a solução técnica escolhida, sem a presença do apoio da energia nuclear, a humanidade poderá realmente entrar em uma crise energética sem precedentes, o qual irá acirrar as diferenças sociais, financeiras e econômicas dentro dos países, e pior, entre os países.

Competições pelas fontes de energia serão mais frequentes e menos lógicas do que vem ocorrendo em conflitos armados até hoje. Água potável, medicamentos, comida e muitos outros recursos dependentes exclusivamente da transformação energética, serão motivo de disputas entre as nações o que poderá levar a uma desestabilização global.

Isso tudo deixa um péssimo pressentimento a respeito destes fatos, além é claro de muita preocupação quanto a latência fleumática e a inobservância do mundo a respeito disso tudo. Tudo o que pode ser feito deve ser feito agora, pois o tempo é implacável com quem fica a sua espera.

REFERÊNCIAS

- ARTISIMOVICH, L.A., Tokamak **Devices**. Nuclear Fusion. v.12, p.215-252, 1972.
- AZAM, M., KHAN, A.Q., OZTURK, I. The Effects of Energy on Investment, Human Health, Environment and Economic Growth: Empirical Evidence from China. **Environmental Science and Pollution Research**. v.26, p.10816–10825, 2019.
- BOYLE, F.I. **Plasmas en el Laboratorio y en el Cosmos**. Reverté Mexicana, 1968. 175p.
- BRUNEKREEF, B., HOLGATE, S.T. Air Pollution and Health. *Lancet*. v.360(9341), p.1233-1242, 2002.
- BURGESS, R., GREENSTONE, M., RYAN, N., SUDARSHAN, A. Demand for Electricity on the Global Electrification Frontier. **Yale Engineering Economics**. p.01-73, 2020.
- 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, p.046028 (01-18), 2021.
- 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(04), p.01-60, 1983.
- COSTLEY, A.E. Towards a Compact Spherical Tokamak Fusion Pilot Plant. *Philos. Trans. R. Soc. A*. v.377(2141), p.20170439, 2019.
- 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. p.217-271, 2009.
- FELTRIN, A.N. **Energy Equality and the Challenges of Population Growth**. Relations Beyond Anthropocentrism, Energy Ethics: Emerging Perspectives in a Time of Transition. p.313-320, 2018.
- FRIGO, G. **Energy Ethics: A Literature Review**. Relations Beyond Anthropocentrism, Energy Ethics: Emerging Perspectives in a Time of Transition. p.177-214, 2018.

- GALAMBOS, J.D., PERKINS, L.J., HANEY, S.W., MANDREKAS, J. Commercial Tokamak Reactor Potential with Advanced Tokamak Operation. **Nuclear Fusion**. v.35(5), p.551-573, 1995.
- GREENSTONE, M., REGUANT, M., RYAN, N., DOBERMANN, T. **Energy and Environment**. IGC International Growth Centre, London School of Economic. p.01-44, 2019.
- HAINES, A., SMITH, K.R., ANDERSON, D., EPSTEIN, P.R., McMICHAEL, A.J. ROBERTS, I., WILKINSON, P., WOODCOCK, J., WOODS, J. Policies for Accelerating Access to Clean Energy, Improving Health, Advancing Development, and Mitigating Climate Change. **Energy and Health** 6, Lancet. v.370(06), p.01-18, 2007.
- HANDLEY, M.C., SLESINSKI, D., HSU, S.C. Potential Early Markets for Fusion Energy. **Journal of Fusion Energy**. v.40(18), p.1-17, 2021.
- HERMAN, R. **Fusion - The Search for Endless Energy**. University Cambridge, 1990. 280p.
- HIWATAR, R., GOTO T. Assessment on Tokamak Fusion Power Plant to Contribute to Global Climate Stabilization in the Framework of Paris Agreement. **Plasma and Fusion Research**. v.14, p.1305047(1-5), 2019.
- HODGSON, P.E. Energy, the Environment and Nuclear Power. **JAERI Conference**. p.0-10, 2005.
- HODGSON, P.E. **Energy, the Environment and Climate Change**. Imperial College Press. 2010. 220p.
- KIES, A., SCHYSKA, B.U., BILOUSOVA, M., EL SAYED, O., JURASZ, J., STOECKER, H. Critical Review of Renewable Generation Datasets and their Implications for European Power System Models. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v.152, p.1-15, 2021.
- LACKNER, K. Dimensionless Engineering Variables for Measuring the ITER and Reactor Relevance of Tokamak Experiments. **Fusion Sci. Technol**. v.54, p.989-993, 2008.
- LAVE, L.B., and FREEBURG, L.C. **Air Pollution Health Effects of Electricity Power Generation**. Norwegian Institute for Air Research, 1975. 274p.
- LIU, L., JOHNSON, H.L., COUSENS, S., PERIN, J., SCOTT, S., LAWN, E., RUDAN, I, CAMPBELL, H., CIBULSKIS, R., LI, M., MATHERS, C., BLACK, R.E. Global, Regional, and National Causes of Child Mortality: An Updated Systematic Analysis for 2010 with Time Trends Since 2000. **Lancet**. v.379(09), p.01-11, 2012.
- LIU, L., VILLAVICENCIO, F., YEUNG, D., PERIN, J., LOPEZ, G. STRONG, K.L., BLACK, R.E. National, Regional, and Global Causes of Mortality in 5 – 19 year olds from 2000 to 2019: A Systematic Analysis. **Lancet**. v.10, p.227-347, 2022.
- MCCRACKEN, G., STOTT, P. Fusion: The Energy of the Universe. **Academic Press**. 2012. 248p.
- MISHRA, A.K., ANITHA, G. Nuclear Fusion Reactor – A Review Study. **International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD)**. v.4(03), p.2456-6470, 2020.
- MOHAMMED, M., AKUOKO, M. Subnational Variations in Electricity Access and Infant Mortality: Evidence from Ghana. **Health Policy Open** 3, **ScienceDirect**. p.1-12, 2022.
- NAKCENOVI, N. **Energy and Challenge of Susteinability** - Chapter 9 - Energy Scenarios. World Energy Assessment. 2000. 506p.
- NETA, G., MARTIN, L., COLLEMAN, G. Advancing Environmental Health Sciences Through Implementation Science. **Environmental Health**. p.21-136, 2022.
- PASTERNAK, A.D. Global Energy Futures and Human Development: A Framework for Analysis. **Lawewnce Livermore National Laboratory (FR0202056)**. p.1-5, 1998.
- PERIN, J., MULICK, A., YEUNG, D., VILLAVICENCIO, F., LOPEZ, G., STRONG, K.L., MERINO-PRIETO, D., COUSENS, S., BLACK, R.E., LIU, L. Global, Regional, and National

- Causes of under-5 Mortality in 2000–19: An Updated Systematic Analysis with Implications for the Sustainable Development Goals. **Lancet**. v.6, p.106-115, 2022.
- ROMANELLO, M., DI NAPOLI, C., DRUMMOND, P., all Team, A. The 2022 Report of the Lancet Countdown on Health and Climate Change: Health at the Mercy of Fossil Fuels. **Lancet, Countdown**. v.400(05), p.1-36, 2022.
- SHOBANDE, O.A. The Effects of Energy use on Infant Mortality Rates in Africa. *Environmental and Sustainability*, **ScienceDirect**. p.1-11, 2020.
- 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, p.159-88, 2013.
- TRYGGESTAD, C. **Global Energy Perspective 2019**: Reference Case. Energy Insights McKinsey. p.1-31, 2019.
- WEA. **Energy - and the Challenge of Sustainability**. WEA - World Energy Assessment. United Nations Development Programme, United Nations Department of Economic and Social Affairs, World Energy Council. 2000. 506p.
- WHO. **Ambient Air Quality Database**. World Health Organization Status Report 2022 Update. p.01-28, 2023.
- WILKINSON, P., SMITH, K.R., BEEVERS, S., TONNE, C., ORESZCZYN, T. Energy, Energy Efficiency, and the Built Environment. *Energy and Health 4*, **Lancet**. p.42-54, 2007.
- 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), p.97-107, 2021.
- WILTGEN, F., Estados Físicos da Matéria. *Ciência e Tecnologia: Temáticas e Fundamentos*. Editora Uniesmero. Cap.9, v.3, p.106-130, 2022A.
- WILTGEN, F. Fusão Termonuclear Controlada por Confinamento Magnético do Plasma em Máquinas do Tipo Tokamak. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia (RMCT)**. p.1-6. Aguardando publicação, 2022B.
- 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. p.1-10, 2022C.
- 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. p.1-10, 2022D.
- WILTGEN, F. The Pragmatic Dichotomy of Energy in the World. **Revista de Humanidade, Tecnologia e Cultura**. p.1-10, 2022E.
- WILTGEN, F. Panorama Pragmático do Desafio Energético Mundial – Perspectivas a Longo Prazo. REPATEC – **Revista de Pesquisa Aplicada e Tecnologia**. p.1-12, 2023A. Aguardando publicação.
- WILTGEN, F. Nível de Maturidade Tecnológica da Fusão Nuclear via Confinamento Magnético do Plasma em Tokamaks. **Revista Tecnologia**. p.1-15, 2023B. Aguardando publicação.
- XIAO, X., XIAO, X., LAN, Y., CHE, J. Learning from Nature for Healthcare, Energy, and Environment. **The Innovation**. v.2(100135 - 28), p.01-02, 2021.
- YICAN, W.; SUMER, S. **Fusion Energy Production**. Elsevier Comprehensive Energy Systems. v.3, p.539-589, 2018.