
**Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Energia Nuclear**



**Curso de Graduação:
Engenharia de Energia**

**Disciplina:
EN248 Projeto de Graduação
(TCC)
Responsável pela Disciplina:
Prof. Alexandre Costa
Período:
2022.1
Local e Data:
Recife, 07 de novembro de 2022**

Monografia

**O PAPEL DA ENERGIA NUCLEAR NA TRANSIÇÃO E NA SEGURANÇA E
AUTOSSUFICIÊNCIA ENERGÉTICA DOS PAÍSES**

Aluno: Felipe Roberto Barros de Moura

Orientador: Jair de Lima Bezerra

Orientador: Mário Augusto Bezerra da Silva

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Moura, Felipe Roberto Barros de.

O papel da energia nuclear na transição, na segurança e autossuficiência energética dos países / Felipe Roberto Barros de Moura. - Recife, 2022.
32 : il., tab.

Orientador(a): Jair de Lima Bezerra

Cooorientador(a): Mário Augusto Bezerra da Silva

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Energia - Bacharelado, 2022.

1. Energia Nuclear. 2. SMR. 3. Transição Energética. I. Bezerra, Jair de Lima. (Orientação). II. Silva, Mário Augusto Bezerra da . (Coorientação). III. Título.

620 CDD (22.ed.)

ÍNDICE

Resumo.....	3
1.Introdução.....	4
2. Conceitos Preliminares.....	5
2.1 CAPEX.....	5
2.2. Economia de Escala.....	5
2.3 Modularização.....	5
2.4 Custo de Capital.....	6
2.5 OCDE.....	6
2.6 LTO.....	6
2.7 LCOE.....	6
3. Revisão Bibliográfica e Enunciado do Problema.....	7
3.1 Desafios da Transição Energética.....	7
3.2 Cenário Atual da Energia Nuclear.....	10
3.3 Falta de Investimento em Geração Nuclear.....	13
3.4 O Papel da Energia Nuclear na Transição Energética.....	15
3.5 Perspectivas para Energia Nuclear.....	17
3.6 SMRs como Solução.....	18
3.7 SMRs versus Outras Fontes.....	21
4. Metodologia.....	22
5. Estudo de Caso.....	25
6. Conclusões e Perspectivas.....	29
Agradecimentos.....	30
Referências Bibliográficas.....	31

Resumo

A atual matriz energética global, ainda conta, em sua maior parte, com grande dependência por fontes fósseis como carvão e gás natural, uma vez que o aumento da capacidade instalada de fontes renováveis e não poluentes nos últimos anos não foi capaz de acompanhar o aumento da demanda energética global. Dessa forma, esse trabalho tem como objetivo mostrar a importância de se retomar a agenda de investimentos na geração nuclear, em complemento a solar e eólica, como forma de se alcançar os objetivos de redução de emissão de carbono, através principalmente das novas tecnologias na área nuclear como os SMRs. Por fim, é ilustrado a competitividade econômica de um SMR frente a duas fontes fósseis: Gás e Carvão, através do seu menor custo financeiro por produção de energia.

Palavras-chave: Energia; Nuclear; Sustentável; Transição; Matriz.

1. Introdução

Além das contribuições individuais dos países e compromissos multilaterais, a COP26 encerrou com o Pacto de Glasgow, o único que resulta de todo o processo de negociação que culmina em uma COP. Em referência à mitigação das mudanças do clima, o Pacto coloca o objetivo de 1,5°C no centro dos esforços globais – um avanço em relação ao Acordo de Paris, cuja menção expressa era “bem abaixo de 2°C”. Para atingir esse objetivo, Glasgow reconhece que será necessária uma redução das emissões globais de carbono em 45% até 2030 em relação ao nível de 2010 e a obtenção de emissões zero líquidas em meados de 2050, bem como reduções significativas de outros gases de efeito estufa.

No contexto desse trabalho, que visa estudar o papel fundamental da energia nuclear para se alcançarem os objetivos acima mencionados, se destaca que o que está acontecendo atualmente é exatamente o oposto ao que será aqui proposto. Os países que atualmente contam com uma produção nuclear relevante enfrentam um envelhecimento generalizado de seus reatores e uma diminuição cada vez maior na adição de nova capacidade de geração nuclear, justamente por falta de investimentos.

Com isso, será feita uma revisão bibliográfica do atual contexto da geração nuclear global e apontado o atual problema de envelhecimento e perda de capacidade das usinas, e com isso será proposto o investimento nas novas tecnologias, como o SMR, de forma a se complementar a atual curva de crescimento das fontes eólicas e solar e em substituição as fontes mais poluentes como gás e carvão.

Por fim, será calculado, na seção de estudo de caso, o custo nivelado da eletricidade para um SMR e para uma usina à gás e uma usina à carvão, onde ficará ilustrado a maior competitividade econômica desse tipo de reator frente a essas alternativas fósseis.

2. Conceitos Preliminares

2.1 CAPEX

CAPEX é a sigla da expressão inglesa *Capital Expenditure*, que pode ser definida como Despesas de Capital ou Investimentos em Bens de Capitais. Esse tipo de custo existe para manter ou até expandir o escopo das operações de uma empresa.

Ele é um conceito muito importante no mundo dos negócios, pois, ele avalia o fluxo de caixa sendo utilizado em investimentos nas empresas.

Por exemplo, os gastos com a construção de uma nova fábrica, ou as aquisições de frotas de veículos, são exemplos de CAPEX.

2.2 Economia de Escala

O conceito de economia de escala pode ser entendido como um tipo de vantagem operacional relacionada aos custos operacionais, que surgem com o aumento da produção de um determinado produto desenvolvido em escala industrial.

Dessa maneira, esse conceito trata-se de uma relação inversa entre a quantidade produzida de certo produto e os seus custos fixos por unidade.

Ou seja, quanto maior a quantidade de um bem produzido, a tendência é que menor seja o seu custo fixo de desenvolvimento por unidade, haja vista que esses custos estão distribuídos por um número maior de mercadorias.

2.3 Modularização

Modalidade de construção em unidades separadas (módulos), construídos separadamente e reunidos no local de construção da usina. Os principais benefícios da modularização são: controle maior do ambiente de construção, maior qualidade dos componentes (uma vez que são construídos separadamente), menor tempo de construção e menor custo de manutenção dos componentes.

2.4 Custo de Capital

O custo de capital próprio (K_e) é uma medida implícita que revela as expectativas de retorno dos recursos próprios investidos na empresa, calculada com base em taxas de juros de mercado e no risco. Pode ser entendido como a remuneração mínima que viabiliza economicamente um investimento, ou seja, a que produz um retorno capaz de cobrir o custo de oportunidade do capital investido.

2.5 OCDE

Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (português), é uma organização econômica intergovernamental com 38 países membros, fundada em 1961 para estimular o progresso econômico e o comércio mundial.

É um fórum de países que se descrevem comprometidos com a democracia e a economia de mercado, oferecendo uma plataforma para comparar experiências políticas, buscar respostas para problemas comuns, identificar boas práticas, coordenar as políticas domésticas e internacionais de seus membros. A maioria dos membros da OCDE é formada por economias de alta renda, com um Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) muito alto e consideradas países desenvolvidos.

2.6 LTO

Long-term operation (operação de longo prazo) é o investimento feito nos atuais reatores para alongar o seu tempo de vida útil e mostrado (PROJECTED, 2020) como uma das alternativas mais baratas de geração de energia de baixa emissão de carbono.

2.7 LCOE

LCOE, ou custo nivelado de eletricidade, também conhecido como Custo de Energia Nivelado (LEC), é o valor presente líquido do custo unitário de eletricidade ao longo da vida útil de um ativo de geração. A análise LCOE considera os custos distribuídos ao longo do ciclo de vida do projeto, fornecendo um quadro financeiro altamente preciso que os operadores do sistema preferem ao longo do cálculo simples de custo por watt frequentemente usado na indústria. O LCOE calcula o custo real, medido em usd / kWh de energia produzida.

3. Revisão Bibliográfica e Enunciado do Problema

O IPCC, definiu uma meta de 80% de toda geração de energia elétrica global advir de fontes de baixo carbono em 2050 como forma de limitar o aumento das temperaturas globais. Com as recentes revisões para limitar esse aumento em 1,5°C, os principais cenários traçados pelo IPCC agora demandam uma completa descarbonização do sistema elétrico global até 2050.

Em todos os cenários traçados pelo IPCC (AQUECIMENTO, 2018), a participação da energia nuclear sofre um aumento expressivo em relação ao reportado em 2010: de +59% a 106% até 2030 e de +98% até 501% até 2050. Em todos os cenários traçados, a capacidade média da geração nuclear deve dobrar entre 2020 e 2050 como forma de se alcançarem os objetivos de carbonização.

3.1 Desafios da Transição Energética

Os investimentos em fontes fósseis sofreram uma queda abrupta desde o pico observado em 2014, com uma queda de 61%, de 1,3 trilhão de dólares para 0,8 trilhão em 2020, ilustrado na figura 1. Os projetos de investimento nessas fontes passam por reduções desde 2014, devido ao atual foco global das economias desenvolvidas em investir em fontes renováveis de energia. Porém, os investimentos feitos nessas fontes não foram suficientes para compensar a queda relevante na adição de capacidade dos combustíveis fósseis, uma vez que esses projetos renováveis demandam maiores investimentos por capacidade de geração.

A média de Capex de um projeto de geração renovável é o dobro do capex de um projeto de petróleo e gás, o que irá aumentar a necessidade de investimento no setor energético para os próximos anos. Segundo Goldman Sachs (CARBONOMICS, 2022) a estimativa é de um Capex incremental de 1,5 trilhão de dólares por ano até 2032.

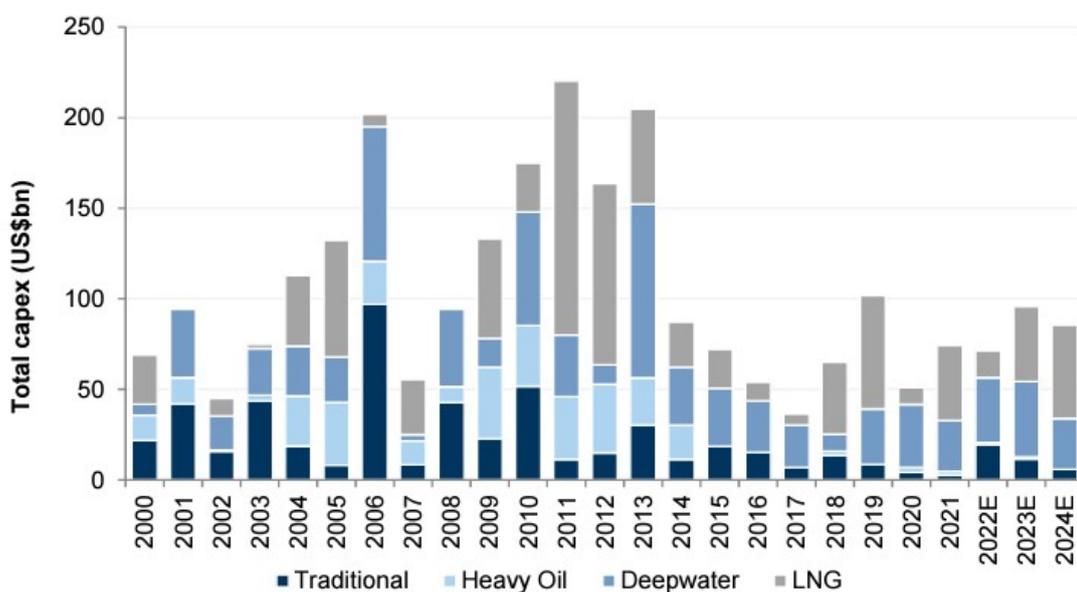


Figura 1. Investimento Total Anual no Setor de Óleo e Gás, dividido por segment (Fonte: Goldman Sachs Global Investment Research, 2022)

A drástica redução no ritmo de adição da capacidade de petróleo e gás somada a um crescimento abaixo do necessário da capacidade instalada de projetos renováveis, não acompanharam o aumento de demanda global energética, o que além de episódios de escassez energética, fez com que os preços atuais de petróleo e gás se mantivessem em patamares elevados, além disso, questões de segurança energética, como o episódio recente do conflito entre Rússia e Ucrânia e as sanções impostas por uma série de países ocidentais à Rússia, ilustraram a dependência de boa parte da Europa ao petróleo e ao gás russo, o que vem causando uma severa crise energética no continente Europeu.

Dessa forma, é esperado que as recentes discussões sobre segurança energética, resiliência e diversificação da matriz dos países levem a uma nova era de investimentos no setor energético, e aqui destaca-se o papel de protagonismo que a energia nuclear deva voltar a ter.

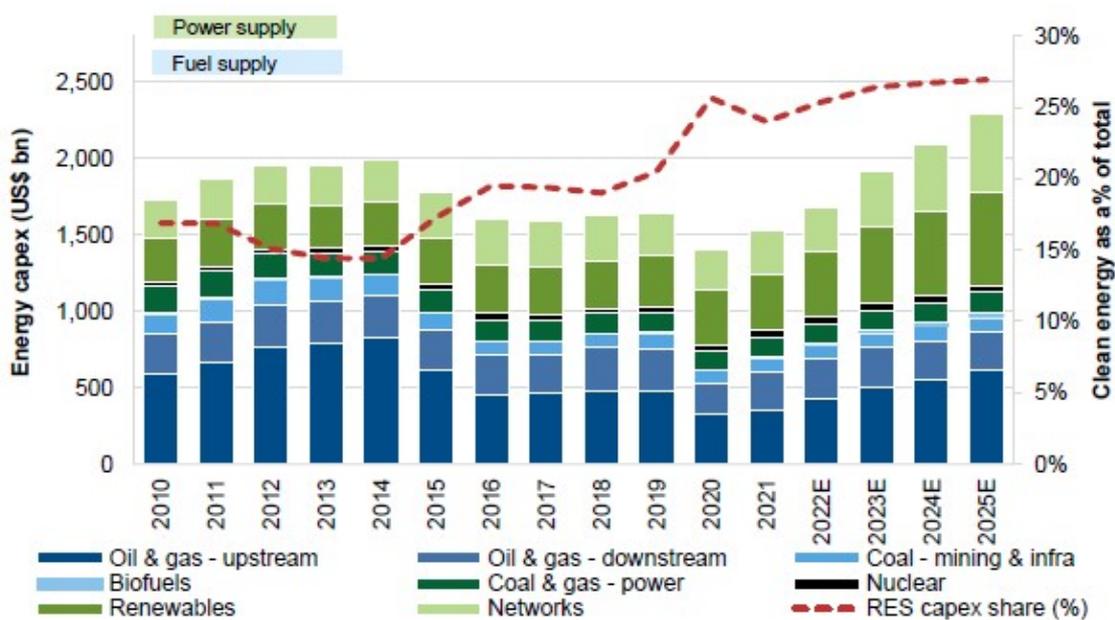


Figura 2. Composição histórica da matriz energética global (Fonte: Agência Internacional de Energia, Goldman Sachs Global Investment Research, 2022)

Além dos aumentos ocasionados nos preços dos combustíveis fósseis, a corrida pela transição energética para fontes não poluentes tem causado um efeito inflacionário nas principais matérias-primas utilizadas nesses projetos, uma vez que sua oferta é inferior a demanda desses projetos. A maior demanda é principalmente por lítio, cobalto, níquel e cobre, dessa forma um aumento abrupto de demanda por projetos renováveis é um forte causador de pressão nos preços dessas matérias-primas, que deve ter efeito adverso na economia, uma vez que esses minerais são utilizados em diversas áreas importantes. Porém é importante frisar que atualmente já existem diversas pesquisas no sentido de se desenvolver novos materiais que mitigariam o efeito inflacionário na demanda por essas matérias primas, o que é de extrema importância para a continuidade do crescimento da curva de adição de nova capacidade às fontes eólica e solar.

The transition for a greener economy is fueling a huge demand for key raw materials.

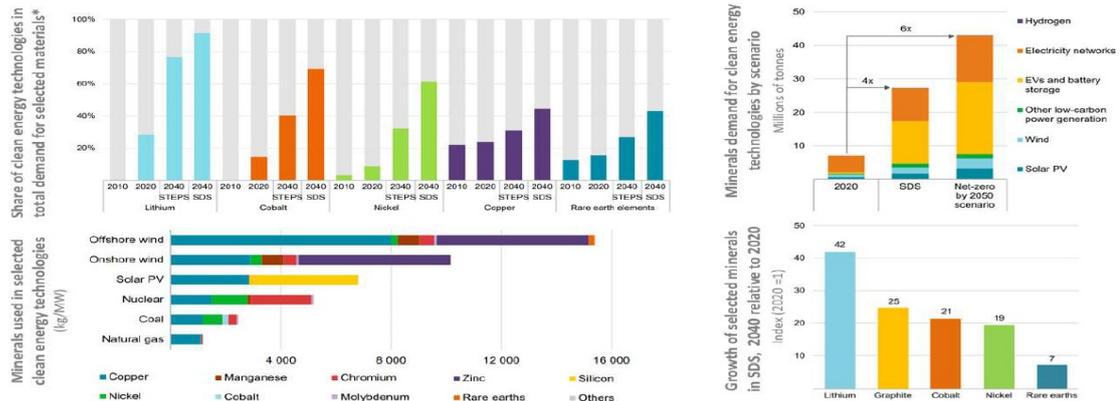


Figura 3. Inflação de matérias primas causada pela transição energética (Fonte: Agência Internacional de Energia)

Os desafios impostos pela atual transição energética que vive a sociedade é a principal motivação deste trabalho, que busca mostrar que a retomada de uma agenda relevante de investimentos em energia nuclear em complemento ao atual crescimento das fontes eólicas e solar, deve ser a melhor alternativa para se alcançar o objetivo de uma economia cada vez menos dependente de fontes emissoras de carbono e a uma maior segurança e autossuficiência energética nos países e no sistema global.

3.2 Cenário Atual da Energia Nuclear

A geração nuclear responde por aproximadamente 10% da oferta global de energia elétrica. Segundo dados de maio de 2019, haviam 452 reatores em operação, espalhados por 31 países ao redor do mundo, detalhado na figura 4

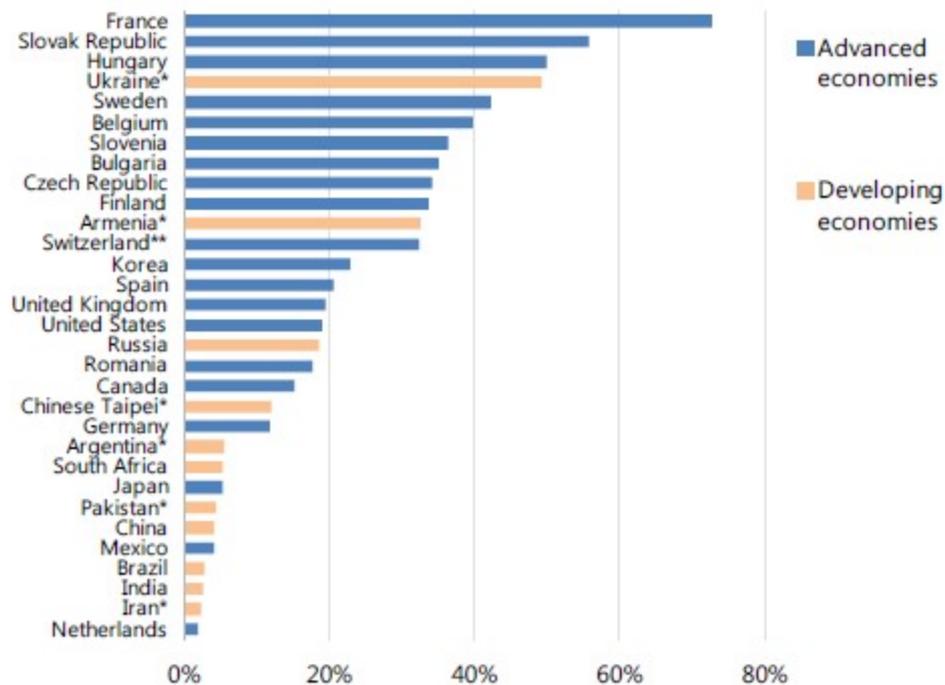


Figura 4. Participação da geração nuclear na geração elétrica total de cada país (Fonte: Agência Internacional de Energia, 2019)

A maioria dos reatores em operação foram construídos durante os anos de 1970 e 1980, porém com o custo de geração por gás natural caindo significativamente, a construção de novas usinas reduziu bastante nos anos 1990 e com isso a participação da energia nuclear na geração global. Dos anos 2000 até os dias de hoje, a construção de 37 reatores de 3ª geração na China reverteu um pouco essa tendência. No entanto, na Europa e na América do Norte, a construção de novos reatores segue estagnada.

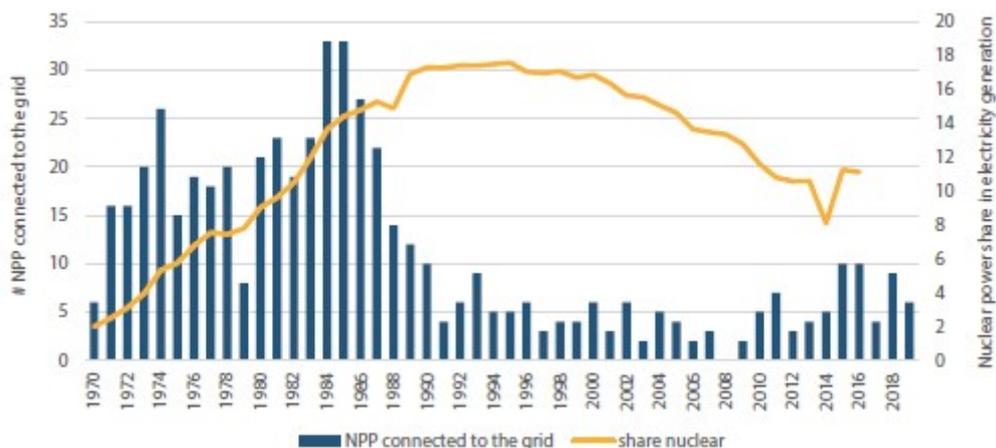


Figura 5. Número de Usinas Nuclear conectadas a rede elétrica e participação da geração nuclear na Geração total de eletricidade (Fonte: Agência Internacional Nuclear, 2021)

A IEA (NUCLEAR, 2019) consolida as estatísticas advindas da geração nuclear. Nas economias desenvolvidas, a fonte nuclear representa a maior fonte de baixa emissão de carbono, respondendo por 40% do total de toda capacidade instalada de fontes não poluentes.

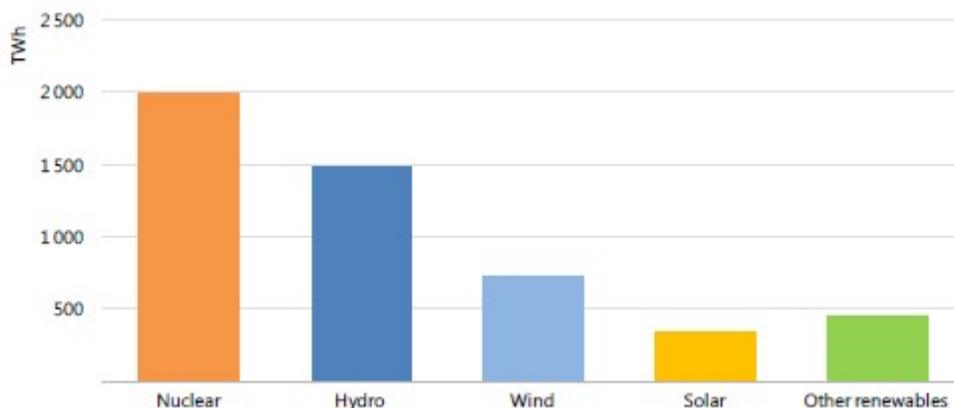


Figura 6. Geração de baixo carbono nos países desenvolvidos, por fonte, em 2018 (Fonte: Agência Internacional de Energia, 2019)

No acumulado dos últimos 50 anos, as usinas nucleares dos países desenvolvidos geraram mais de 10 vezes a eletricidade gerada pelas fontes solar e eólica juntas, como ilustrado na figura 7, com os dados da Agência Internacional de Energia.

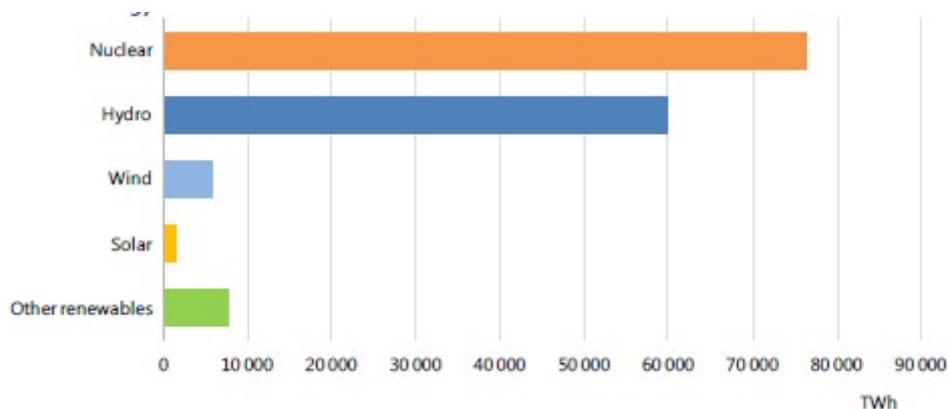


Figura 7 - Geração de baixo carbono acumulada nos países desenvolvidos, por fonte, entre 1971 e 2018 (Fonte: Agência Internacional Nuclear, 2021)

O dado por si só já mostra a importância da fonte nuclear numa agenda de forte redução de emissões de gases causadores do efeito estufa, o que fica ainda mais evidente no dado abaixo: Em escala global, a geração nuclear evitou a emissão de 63 gigatoneladas de dióxido de carbono entre 1971 e 2018, conforme ilustrado na Figura 8. Sem a geração nuclear, as emissões de gases causadores do efeito estufa teriam sido 20% maiores.

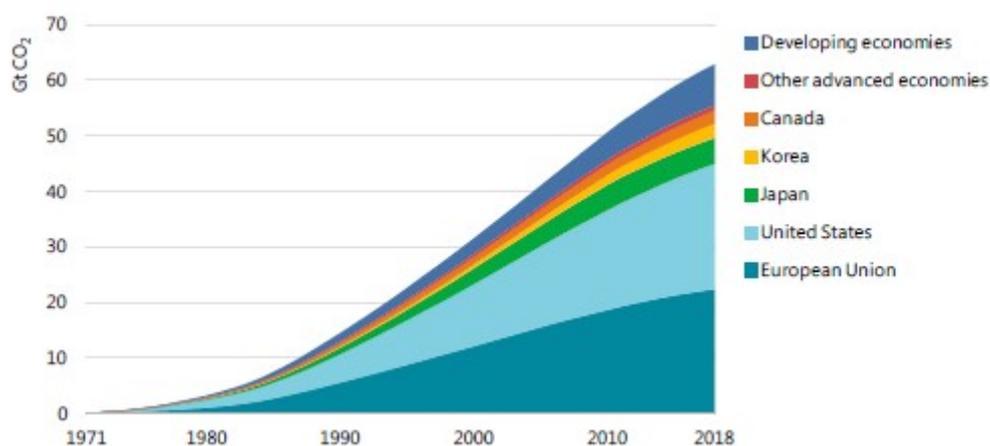


Figura 8. Emissões acumuladas de CO₂ evitadas devido a geração Nuclear (Fonte: Agência Internacional de Energia, 2019)

A mediana das emissões causadas pelas usinas nucleares é de 12g/kWh, e se assemelha ao nível de emissão da energia eólica e das usinas solares, ilustrados na figura 9.

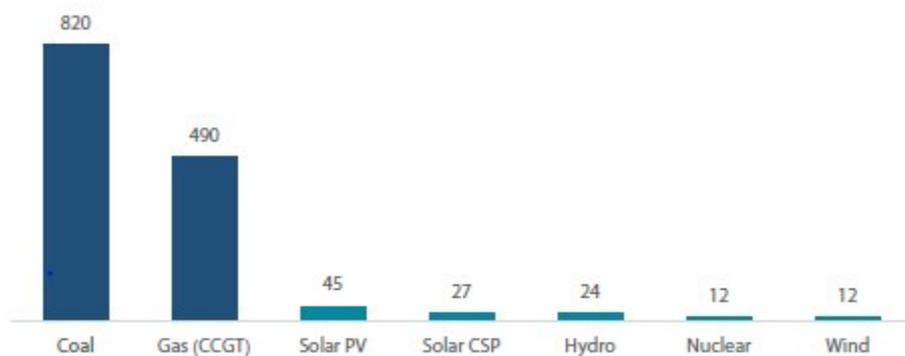


Figura 9. Emissões de CO₂ em g/KWh durante o ciclo de vida das diferentes fontes de geração (Fonte: IPCC 5º Assessment Report; Schiomer S, et al., 2014)

3.3 Falta de Investimento em Geração Nuclear

Fica claro que para se alcançarem os objetivos de redução de emissão até 2050, a energia nuclear deverá desempenhar um papel fundamental. Portanto faz-se de extrema urgência reverter a atual tendência dessa modalidade de geração ao redor do mundo.

Nas principais economias desenvolvidas, a capacidade nuclear diminui pouco a pouco, com algumas usinas fechando e baixo investimento sendo feito, justamente num momento que o mundo mais precisa de fontes de baixo carbono. A IEA (NUCLEAR,2019) mostra que caso a atual tendência seja mantida, a capacidade instalada nuclear das economias desenvolvidas

será reduzida em dois terços até 2040, o que iria totalmente de encontro às metas de redução de emissões propostas pelo acordo de Paris.

A matriz nuclear tem um papel importante na geração de energia elétrica, respondendo por 10% da oferta global em 2018, sendo essa fatia de 18% nos países desenvolvidos e respondendo como a principal fonte de baixa emissão de carbono. No entanto, sua participação na matriz energética global vem diminuindo nos últimos anos devido ao envelhecimento dos atuais reatores e baixo investimento em aumento de capacidade sendo feito. Somado a isso, alguns reatores construídos nos anos de 1970 e 1980 foram desligados. União Europeia e Estados Unidos possuem a maior quantidade de reatores ativos e também a maior idade média, sendo 35 anos na União Europeia e 39 anos nos Estados Unidos. A maioria desses reatores foi projetada para operar por 40 anos, dessa forma cerca de um quarto da capacidade nuclear dos países desenvolvidos seria reduzida até 2025.

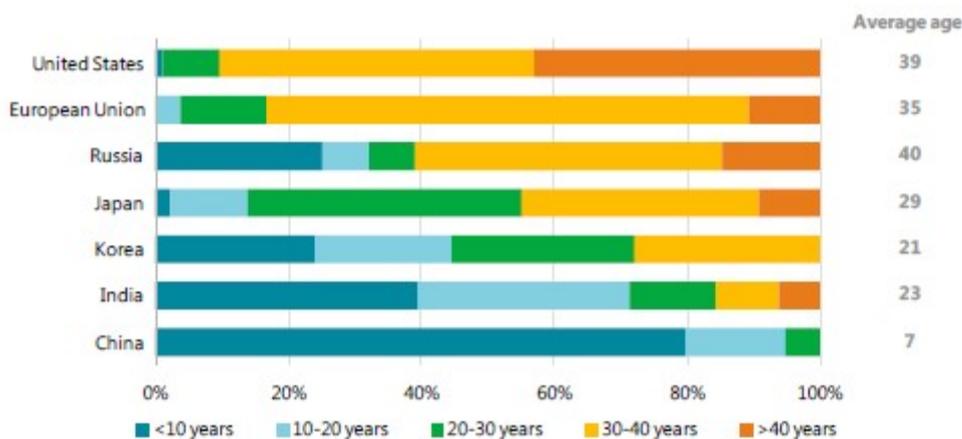


Figura 10. Perfil de idade dos reatores nuclear em alguns países e regiões (Fonte: Agência Internacional de Energia, 2019)

Essa tendência de falta de investimento em energia nuclear deverá ter consequências nas emissões, nos custos e na segurança energética. Caso novos investimentos não sejam realizados para estender o tempo de vida útil dos reatores nas economias desenvolvidas e em novos projetos, a capacidade nuclear desses países seria reduzida em dois terços até 2040. Com isso, gás natural e carvão teriam de suprir essa queda na geração nuclear, o que poderia aumentar as emissões de CO2 em 4 bilhões de toneladas até 2040, tornando ainda mais difícil as metas estabelecidas no acordo de Paris.

O problema da falta de investimentos já pode ser observado, uma vez que a participação da geração nuclear na oferta global de eletricidade já apresentou uma queda dos 18%, pico observado nos anos 1990, para cerca de 10% em 2018.

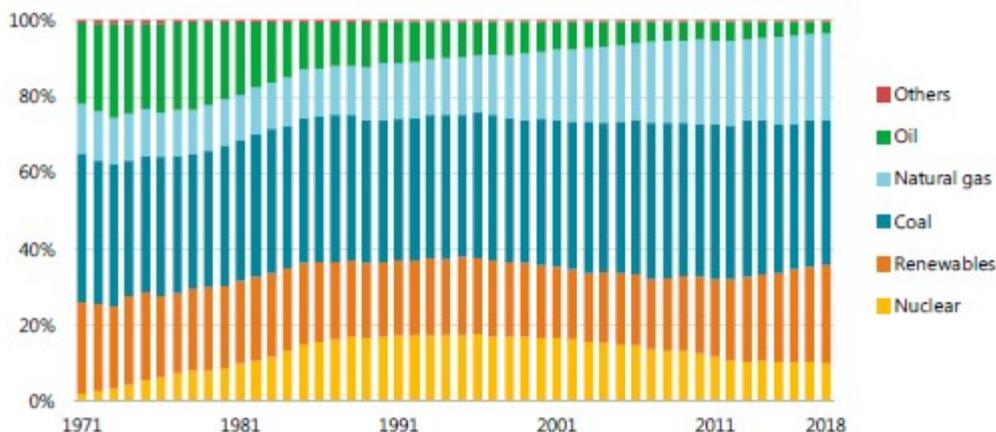


Figura 11. Participação de cada fonte na geração de eletricidade global (Fonte: Agência Internacional de Energia, 2019)

Além disso a necessidade de investimentos adicionais seria vultosa. Um declínio na geração nuclear nas economias desenvolvidas, demandaria novos investimentos em novas formas de geração e em infraestrutura. Cerca de 1,6 trilhão de dólares adicionais no setor elétrico seria necessário até 2040. Apesar do contínuo declínio no custo de novas plantas de solar e eólica, ainda assim seria muito mais caro do que o investimento em alongar a vida útil dos atuais reatores

Segundo cálculos da agência internacional de energia, para se alcançarem os objetivos internacionais climáticos a expansão da capacidade de fontes limpas de energia deveria ser três vezes maior do que é hoje. Além disso, em aderência às metas propostas de emissão de gases de efeito estufa, seria necessário que 85% da geração global de energia viesse de fontes limpas até 2040, comparado com apenas 36% hoje. Além de um grande investimento em eficiência e capacidade de outras renováveis, seria necessário um aumento de 80% da capacidade nuclear até 2040.

3.4 O Papel da Energia Nuclear na Transição Energética

Diante do anteriormente exposto, é visível que a geração nuclear terá um papel essencial nesse processo de independência das fontes intensas em carbono e ressalta-se novamente que segundo o cenário de desenvolvimento sustentável traçado pela NEA (NUCLEAR, 2021) para se atingirem os objetivos propostos no acordo de Paris a capacidade instalada nuclear deverá

aumentar em 35% entre 2020 e 2040, o que vai de encontro às tendências de declínio da geração nuclear expostas anteriormente.

Para se alcançarem esses objetivos será necessário o investimento no alongamento da vida útil dos atuais reatores, a construção de novos e o investimento nas novas tecnologias, como os pequenos reatores modulares, que será o foco desse trabalho. Para se alcançarem esses objetivos, destaca-se também a importância de políticas de incentivo a essa modalidade de geração de energia, em particular condições financeiras atrativas para o investimento em novas usinas. Além disso, é importante a reversão da visão negativa que boa parte da sociedade tem da energia nuclear, principalmente no tocante à segurança das usinas e do descarte adequado dos rejeitos gerados na operação, aversão ainda muito vívida na memória da sociedade pelos acidentes de Chernobyl e Fukushima. Esse esforço por parte das autoridades já começa a ser feito como pode ser evidenciado pelo recente movimento da União Europeia em classificar a energia nuclear como “verde”, movimento que deve ser extremamente positivo para a retomada de uma agenda relevante de investimentos na geração nuclear.

Além disso, a energia nuclear apresenta aplicações além da geração de eletricidade que podem ter papel crucial na descarbonização. Além da capacidade das usinas em operar em estado não intermitente de forma que possa garantir uma integração e estabilidade na rede de geração das outras renováveis, as usinas nucleares podem ser extremamente importantes em aplicações além da geração de energia elétrica, como geração de calor para uso industrial, dessalinização e produção em larga escala de hidrogênio.

Reatores mais avançados (ex: geração 3+, SMR, e 4ª geração) através de diferentes tipos de combustíveis e refrigerantes podem fazer com que esses reatores sejam capazes de operar em maiores temperaturas.

Aquecimento industrial representa quase metade da demanda global por calor, o que pode mitigar grandes emissões de CO₂ através do uso do calor gerado na operação de um reator nuclear.

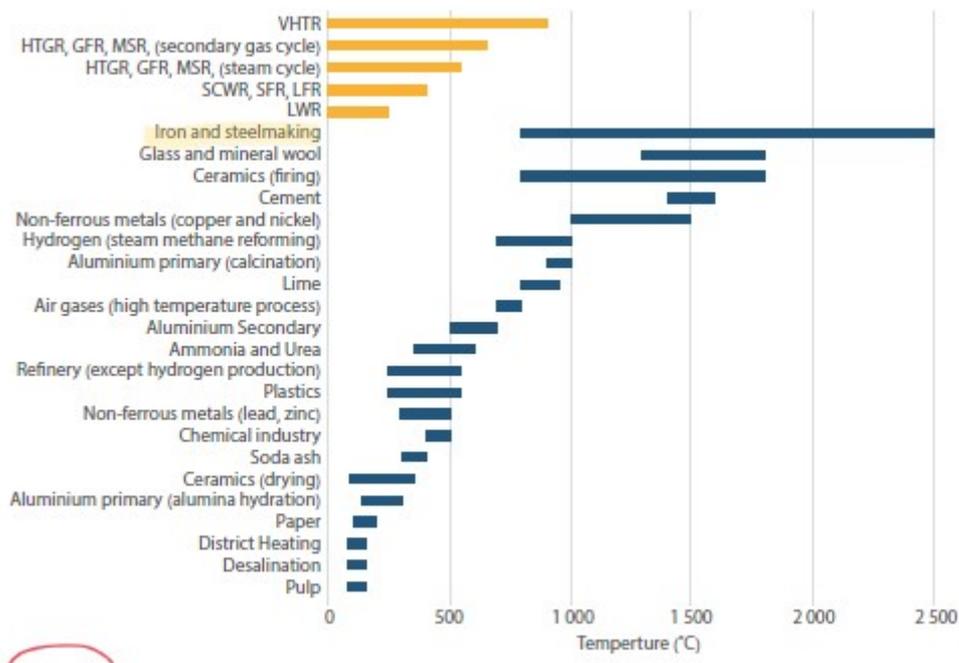


Figura 12. Temperaturas para aplicação industrial (Fonte: Agência Internacional Nuclear, 2021)

No que diz respeito à segurança energética, a flexibilidade de despacho para rede, de acordo com a variação de demanda, faz com que a energia nuclear seja um complemento indispensável para as fontes eólica e solar em países que não dispõem de grande capacidade de geração hidrelétrica. Além disso as usinas são capazes de operar por vários anos com um estoque adequado de combustível de urânio, o que garante segurança energética adicional.

3.5 Perspectivas para Energia Nuclear

Ainda segundo a NEA (NUCLEAR, 2021) os atuais 441 reatores em operação no mundo representam uma infraestrutura capaz de evitar cerca de 1,6 GtCO₂ de emissões por ano.

O papel chave da atual matriz nuclear se torna evidente ao assumirmos que a capacidade instalada de um reator é desativada após 40 anos de operação. Levando em conta essa hipótese, haveria um declínio de mais de 50% da capacidade nuclear até 2040.

De uma perspectiva financeira e apesar do contínuo declínio do custo de capital para as fontes eólica e solar, a adição de nova capacidade de fontes renováveis exigiria muito mais capital do que projetos de LTO (prolongamento de vida útil) para os atuais reatores em operação. De

acordo com a IEA, sem projetos de extensão de vida útil de reatores ou novos projetos nucleares, o custo da oferta de eletricidade seria 80 bilhões de dólares maior por ano nas economias da OECD.

3.6 SMRs como Solução

Uma operação tradicional de usina nuclear apresenta um alto custo fixo, que são diluídos apenas quando o tamanho da usina aumenta de forma expressiva, ou seja, para ser viável economicamente, uma planta nuclear deve apresentar uma alta capacidade instalada, apresentando uma propriedade chamada de economia de escala.

No entanto, através da simplificação, padronização e modularização, os SMR surgem como uma alternativa para o futuro crescimento da geração nuclear.

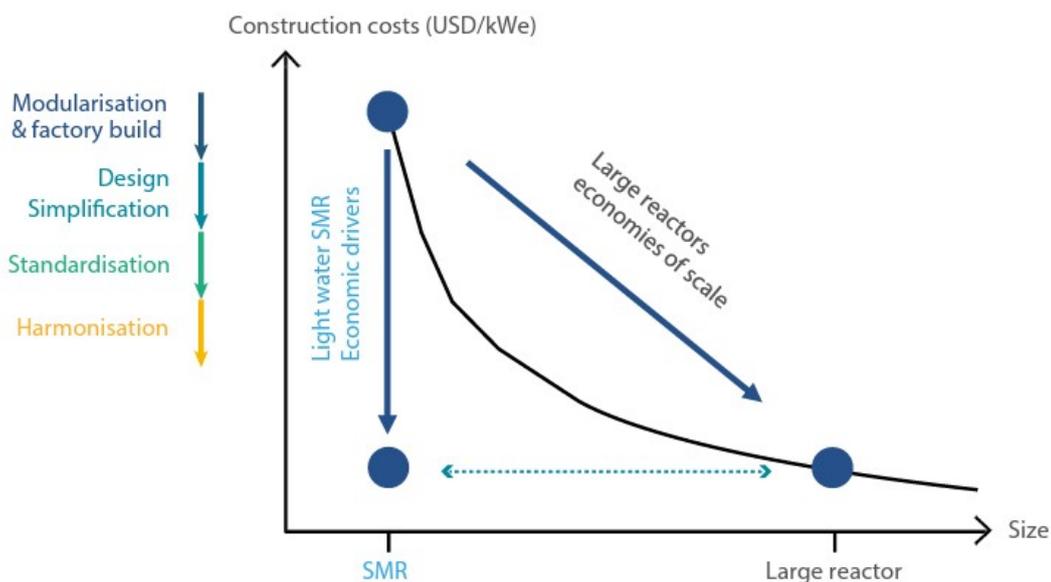


Figura 13. Fatores econômicos que ajudariam os SMRs a compensar a Economia de Escala dos grandes reatores (Fonte: Agência Internacional Nuclear, 2021)

Apesar de ainda ser uma área relativamente nova e em etapa experimental, ainda não dispomos de uma base de dados experimental para a operação desse tipo de reator.

A base para fundamentação deste trabalho parte de uma base dos artigos científicos mais relevantes publicados nessa área.

SMRs segundo Giorgio Locatelli e Benito Mignacca (2022) são mais simples, mais seguros e requerem uma fração do capital quando comparados a um reator tradicional. A IAEA (DOE\ EIA, 2011) define os SMRs como reatores de nova geração, projetados para gerar uma

potência elétrica até 300 MW, onde os componentes e sistemas podem ser fabricados de forma separada e depois transportados como módulos até o local de operação da usina, de acordo com a demanda por eletricidade daquele local.

Os SMRs englobam uma ampla categoria de tecnologias, como os PWRs, a tecnologia mais comum utilizada pelos atuais reatores em operação e em construção. Os SMRs, por sua natureza, foram projetados para serem manufaturados em fábricas e transportados. A palavra modular se refere justamente ao fato de um único reator que pode ser agrupado com outros para formar uma planta nuclear de ordem maior. Esse tipo de reator naturalmente demanda menos trabalho no local de construção da usina, e alguns designs já são pensados para já chegarem totalmente operacionais até o local da usina.

Um ponto que também vale a pena destacar e que será comentado em maior profundidade em seções subsequentes desse trabalho é a possibilidade de se dividir um grande investimento de capital em parcelas menores, uma vez que uma usina nuclear formada por SMRs seria construída por módulos. Além disso, o fato de a potência de uma usina nuclear de SMRs ser modularizado, essa classe de reatores é ideal para cogeração.

No entanto, essa classe de reatores ainda não é considerada economicamente viável por alguns participantes do mercado, pelo conceito da economia de escala proporcionada por um reator tradicional. No entanto, Locatelli, G; Bingham, C and Mancini (2014) mostram que algumas características relevantes dos SMRs são capazes de compensar esse efeito e alguns estudos já chegam em valores equivalentes do custo de capital e do LCOE para um reator tradicional e um SMR como Sheperd & Hayns (1991).

Os SMRs possuem alguns benefícios que são próprios de suas características e dificilmente podem ser replicados num reator tradicional. As características que serão destacadas são: modularização, instalação de múltiplas unidades em um mesmo local, novos designs e soluções.

Modularização é o processo de manufatura em fábrica de módulos que serão transportados e instalados no local de construção da planta de geração. A manufatura em fábrica é mais barata do que a construção no local de operação, mas também limita-se a possibilidade de se obter

um custo de transporte competitivo. Os SMRs podem ter boa parte de seus componentes feitos em fábricas e de maneira isolada uns dos outros.

Múltiplas unidades num mesmo local: SMRs permitem com que investidores façam adições de capacidade incrementais de novos módulos em uma planta de geração já existente o que levaria a certas economias de gastos desembolsados na construção do primeiro módulo, como: aquisição de terras e direitos, conexão a uma rede local etc, chegando-se a conclusão de quanto mais unidades SMRs no mesmo local, menor o investimento por cada uma delas.

Novos designs e soluções: a modularização permite que se simplifique de maneira significativa uma usina nuclear. Isso levaria a uma redução no número de componentes, também a um aumento de segurança dado a diminuição do número de sistemas de segurança e isolamento de cada um dos módulos.

A padronização dos componentes do SMR é uma condição necessária juntamente com o tamanho reduzido das unidades para replicação em fábrica. Vale destacar ainda a economia advinda da produção em massa, uma vez que é possível realizar um grande pedido de componentes, como válvulas por exemplo.

Uma das principais características desse tipo de reator é o seu processo de construção, uma vez que seus componentes podem ser fabricados separadamente para posterior montagem no local de instalação da usina, o que além de reduzir o tempo de construção também reduz os custos fixos associados à construção e montagem do reator. A construção de uma usina tradicional demanda milhares de trabalhadores, trabalhando diariamente, além do uso de equipamentos de elevado custo para execução da obra, o que faz com que o projeto tenha elevado custos fixos.

Além disso, devido à maior agilidade na construção e modularização dos componentes, uma usina de SMR começa a gerar receita mais rápido do que um grande reator e com isso, diminui o custo de financiamento do projeto.

Em relação aos custos durante o tempo de operação, alguns estudos como Sheperd e Hayns (1991) mostram que o custo de capital para um grande reator e quatro SMRs podem ser proporcionais devido às propriedades que proporcionam ao SMR a economia de múltiplos. Os custos de operação, manutenção e combustível combinados, de acordo com a NEA/OECD

para um grande reator varia de 16,9 a 25,8 (\$/MWh) e para um SMR entre 7,1 a 36,2 (\$/MWh).

Por fim, os custos de descomissionamento segundo a NEA/OECD (2021) e a IAEA (2021) parece ser tecnicamente mais baixo para os SMRs devido às suas propriedades de modularização.

Os SMRs, ainda, devido ao seu tamanho reduzido podem desempenhar um papel essencial dentro de um portfólio diversificado de geração de energia, principalmente em conjunto com fontes intermitentes como solar e eólica.

Destaca-se também, a utilidade desse tipo de geração para aplicações além da geração de eletricidade, sobretudo pela sua capacidade de modularização, onde se pode destinar parte da potência instalada da usina para outra finalidade, em que se destacam: geração de calor, dessalinização da água e produção de hidrogênio.

Por fim, Locatelli G, Bingham, C e Mancini, M (2014) listam os SMRs como solução para os principais nichos descritos abaixo:

- Quando SMRS forem competitivos em relação a grandes reatores e a potência requerida seja da ordem de 1 – 3 GWe, com as economias de escala sendo compensadas pelas economias de múltiplos;
- Quando a potência demandada for da ordem de 300 MWe – 1 GWe, potência que não justificaria a construção de um grande reator. Nessa faixa os SMRs podem também ser competitivos em relação ao carvão e ao gás natural;
- SMRs também se enquadram como uma solução ideal para países sem histórico e experiência em energia nuclear, uma vez que a operação de um SMR é mais simples do que a de um reator tradicional;
- Como substitutos para pequenas e médias usinas de combustíveis fósseis em descomissionamento, principalmente num cenário de custo de carbono crescente e legislações mais rígidas em relação ao meio ambiente, o que torna os SMRs ainda mais competitivos frente a essas usinas.

3.7 SMRs versus Outras Fontes

De acordo com a NEA/OECD (2011), a geração nuclear é, em geral, diretamente competitiva em relação a outras tecnologias, principalmente carvão e gás. Como ilustrado pela IEA (PROJECTED, 2020) e exposto na Figura 14 abaixo, o custo médio por MWh da geração Nuclear é um dos mais competitivos diante de toda base de dados investigada pela IEA

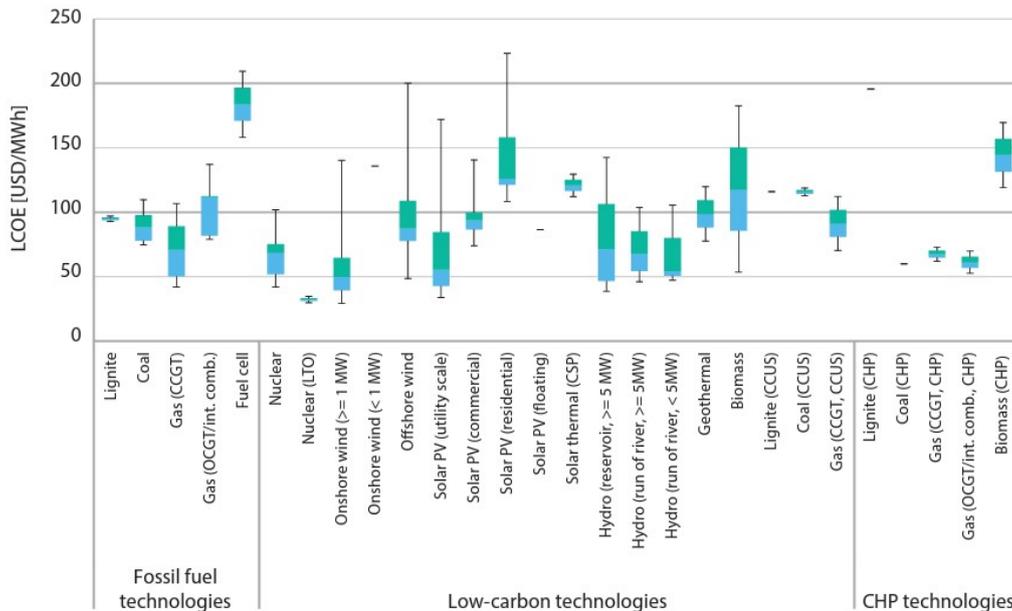


Figura 14. LCOE por tipo de geração. Valores máximos, mínimos, médios e medianos (Fonte: Agência Internacional de Energia)

Como mostrado por G. Locatelli, Bingham, C e M. Mancini (2014), assim como um grande reator, os SMRs também apresentam competitividade em relação à usina a carvão e planta a gás que será o tema de estudo de caso desse trabalho.

4. Metodologia

Para o estudo de caso relatado na seção seguinte, foi calculado o *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) de uma planta de gás, de carvão e de um SMR de potências equivalentes, afim de se obter uma base de comparação dessas três modalidades distintas de geração.

O cálculo do LCOE é obtido através da divisão de todos os custos incorridos pela eletricidade total gerada durante o tempo de operação de uma usina elétrica. Para esse cálculo, foi trazido a valor presente, por uma taxa de desconto de 8% o somatório de todos os custos operacionais, de combustível e o investimento total inicial da usina.

Uma das principais determinantes da competitividade é a taxa de desconto, que corresponde na metodologia LCOE ao custo de capital. A IEA (PROJECTED, 2020) assume uma taxa de desconto uniforme de 7% para todas as tecnologias e países, e este trabalho uma taxa de 8% para todos os casos. Na prática, a taxa de desconto reflete, entre outros fatores, os custos de oportunidade do investimento, bem como diferentes tipos de risco e incerteza. Além disso, no mundo real, a questão de quem assume o risco é importante: subsídios do governo, por exemplo, transfere o risco do investidor para o público. Acordos de compra de energia de longo prazo permitem o compartilhamento do risco entre desenvolvedores de projetos e os compradores da eletricidade gerada. Embora o risco geral permaneça o mesmo, o investimento se tornaria mais barato do ponto de vista do investidor. Também é importante frisar que quanto mais intensiva em capital for uma tecnologia, mais sensível será seu LCOE às mudanças na taxa de desconto conforme ilustrado na figura 15.

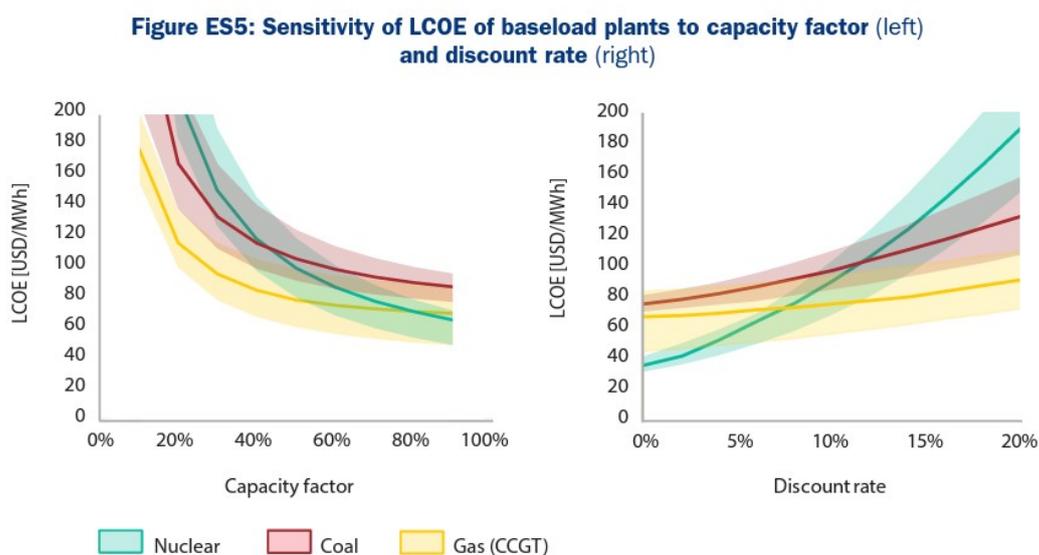


Figura 15. Sensibilidade do LCOE de uma usina nuclear, à carvão e à gás para diferentes valores de fator de carga e de taxa de desconto (Fonte: Agência Internacional de Energia, 2020)

Dessa forma, se reforça que o estudo de caso é feito para uma situação específica, porém seu cálculo pode ser realizado para diferentes cenários, sem prejuízo da metodologia e apenas se alterando as variáveis.

As variáveis do modelo são as expostas na tabela 1:

Tabela 1. Variáveis do modelo de cálculo do LCOE (Fonte: Produzido pelo autor, 2022)

Inputs ('000)
Investimento Inicial Total (\$)
Custos de Operação e Manutenção (\$/MWh)
Custos de Operação e Manutenção (\$)
Taxa de Crescimento O&M
Custo Anual Combustível (\$/MWh)
Custo Anual Combustível (\$)
Potência (MWe)
Potência (KW)
CAPEX (\$/KW)
Investimento Inicial Total ('000)
Tempo do projeto (anos)
Taxa de Desconto

Para as usinas a gás foi considerada uma vida útil de 25 anos, para as usinas de carvão 45 anos e para o SMR uma vida útil de 50 anos.

Os valores de CAPEX, custos de operação e manutenção, combustível e carbono, foram todos retirados do relatório *Projected Costs of Generating Electricity* (PROJECTED, 2020) da Agência Energética Internacional, onde se avaliaram os custos de produção, a eficiência e o fator de capacidade de 243 plantas espalhadas em 24 países dentre os quais membros e não membros da OCDE.

De posse dos valores de custos, da capacidade instalada, do fator de capacidade e da eficiência da planta foi possível se obterem as variáveis necessárias para o cálculo do LCOE, conforme a expressão abaixo:

$$LCOE = \frac{\text{Valor Presente Total dos Custos}}{\text{Valor Presente Total da Energia Produzida}}$$

Equação 1

$$LCOE = \frac{\sum \frac{(I_t + M_t + F_t)}{(1+r)^t}}{\sum \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

Equação 2

Onde:

I_t = Investimento inicial total;

M = Custos de Operação e Manutenção;

F_t = Custos de Combustível;

E = Eletricidade Gerada;

r = Taxa de desconto;

n = Vida útil do sistema;

Para os valores de operação de um SMR de 114-MW foram utilizados os dados do *Energy Impact Center* (EIC), para os custos de operação e manutenção e combustível, através do projeto Open 100 (2022), uma plataforma aberta para servir de referência para futuros projetos relacionados à construção e financiamento de SMRs. Os valores foram obtidos através de adaptações dos custos de um reator padrão do tipo PWR de 1144 MW.

Com isso, foi possível se obter uma relação de custo por KWh produzido para diferentes tipos de geração e dessa forma poder realizar uma comparação direta da competitividade de um SMR frente a uma usina de carvão e de uma usina a gás em cenários nos quais foram considerados ou desconsiderados custos associados ao carbono emitido por essas matrizes fósseis.

5. Estudo de Caso

Foi calculado o *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) a partir da mediana dos valores de combustível, carbono, operação e manutenção e *Capex* para uma usina movida a gás com um fator de capacidade de 85% e uma eficiência de 50%. Os dados utilizados foram os da tabela 2, encontrou-se um valor para o LCOE dos países membros da OCDE e países não membros da OCDE:

Tabela 2. Base de dados para uma Turbina à gás (Fonte: Produzido pelo autor, 2022)

Turbina a Gás com 85% de fator de capacidade					País
Combustível (USD/MWh)	Carbono (USD/MWh)	O&M (USD/MWh)	Capex (USD/KWe)		
56,04	12,75	6,59	955,00		Australia
64,96	1,48	12,87	2.826,00		Australia
45,88	10,18	6,00	767,00		Bélgica
42,65	9,47	4,80	1.009,00		Bélgica
47,06	10,45	6,67	974,00		Bélgica
19,19	10,65	6,96	1.058,00		Canadá
45,50	10,10	6,99	590,00		Itália
61,05	10,84	7,70	1.109,00		Japão
60,82	10,80	11,36	1.107,00		Coréia
58,23	10,34	8,41	838,00		Coréia
21,62	12,00	5,28	669,00		México
18,29	10,15	5,73	667,00		México
18,89	10,48	5,51	466,00		México
47,06	10,45	46,27	254,00		România
18,38	10,20	5,30	952,00		România
22,91	5,09	14,22	2.412,00		Estados Unidos
Países não membros da OCDE					
18,83	10,45	11,21	958,00		Brasil
53,54	10,45	13,49	560,00		China

Tabela 3 – Mediana dos custos para uma usina a gás (Fonte: Produzido pelo autor, 2022)

Mediana	OCDE	Não-OCDE
Combustível	45,69	36,185
Carbono	10,395	10,45
O&M	6,815	12,35
CAPEX	953,5	759,00

Diante dos valores expostos, os inputs para o cálculo do LCOE de uma usina movida a gás foram os dados indicados nas tabelas 4 e 5, para países membros e não membros da OCDE:

Tabela 4 - Países Membros da OCDE (Fonte: Produzido pelo autor, 2022)

Inputs ('000)	
Investimento Inicial Total (\$)	108.642.000
Custos de Operação e Manutenção (\$/MWh)	6,82
Custos de Operação e Manutenção (\$)	776,91
Taxa de Crescimento O&M	2%
Custo Combustível (\$/MWh)	45,69
Custo Combustível (\$)	5208,66
Custo Carbono (\$/MWh)	10,395
Custo Carbono (\$)	1.185,03
Potência (MWe)	114,00
Potência (KW)	114.000
CAPEX (\$/KW)	953
Investimento Inicial Total ('000)	108.642.000
Tempo do projeto (anos)	25
Taxa de Desconto	8,00%

Tabela 5 – Países não membros da OCDE (Fonte: Produzido pelo autor, 2022)

Inputs ('000)	
Investimento Inicial Total (\$)	86.526.000
Custos de Operação e Manutenção (\$/MWh)	12,35
Custos de Operação e Manutenção (\$)	1407,9
Taxa de Crescimento O&M	2%
Custo Combustível (\$/MWh)	36,19
Custo Combustível (\$)	4125,09
Custo Carbono (\$/MWh)	10,45
Custo Carbono (\$)	1.191,30
Potência (MWe)	114,00
Potência (KW)	114.000
CAPEX (\$/KW)	759
Investimento Inicial Total ('000)	86.526.000
Tempo do projeto (anos)	25
Taxa de Desconto	8,00%

Para uma usina de carvão foi utilizada a mesma metodologia, porém considerando uma eficiência de 40%.

Tabela 6. Base de dados para uma planta à Carvão (Fonte: Produzido pelo autor, 2022)

Planta a Carvão com 85% de fator de capacidade				
Combustível (USD/MWh)	Carbono (USD/MWh)	O&M (USD/MWh)	Capex (USD/KWe)	País
29,65	25,47	8,69	2.433,00	Austrália
39,58	3,40	19,34	4.490,00	Austrália
5,13	34,36	1.126,00	3.756,00	Austrália
7,89	5,28	25,56	6.891,00	Austrália
28,73	24,68	19,31	2.419,00	Japão
27,47	23,60	11,62	1.151,00	Coréia
20,19	28,22	30,47	4.382,00	Estados Unidos
20,36	28,46	22,25	3.447,00	Estados Unidos
18,23	25,48	17,01	2.478,00	Estados Unidos
23,50	13,14	30,45	4.604,00	Estados Unidos
17,51	24,47	17,20	2.582,00	Estados Unidos
22,38	12,51	30,15	4.654,00	Estados Unidos
17,16	23,99	29,50	4.157,00	Estados Unidos
23,32	13,04	42,96	5.991,00	Estados Unidos
Países não membros da OCDE				
31,76	32,03	8,60	2.189,00	Brasil
28,02	22,70	14,97	800,00	China
26,43	22,70	8,53	1.148,00	India
26,43	22,70	38,65	1.111,00	India

Tabela 7. Mediana dos custos para uma usina a carvão (Fonte: Produzido pelo autor, 2022)

Mediana	OCDE	Não-OCDE
Combustível	21,37	27,225
Carbono	24,23	22,7
O&M	23,905	11,785
CAPEX	3.956,50	1.129,50

Diante dos valores expostos, os *inputs* para o cálculo do LCOE de uma usina movida à carvão foram os dados indicados na tabela 8:

Tabela 8. Países membros da OCDE (Fonte: Produzido pelo autor, 2022)

Inputs ('000)	
Investimento Inicial Total (\$)	451.041.000
Custos de Operação e Manutenção (\$/MWh)	23,91
Custos de Operação e Manutenção (\$)	2725,17
Taxa de Crescimento O&M	2%
Custo Combustível (\$/MWh)	21,37
Custo Combustível (\$)	2436,18
Custo Carbono (\$/MWh)	24,23
Custo Carbono (\$)	2.762,22
Potência (MWe)	114,00
Potência (KW)	114.000
CAPEX (\$/KW)	3.957
Investimento Inicial Total ('000)	451.041.000
Tempo do projeto (anos)	25
Taxa de Desconto	8,00%

Tabela 9. Países não membros da OCDE (Fonte: Produzido pelo autor, 2022)

Inputs ('000)	
Investimento Inicial Total (\$)	128.763.000
Custos de Operação e Manutenção (\$/MWh)	11,79
Custos de Operação e Manutenção (\$)	1343,49
Taxa de Crescimento O&M	2%
Custo Combustível (\$/MWh)	27,23
Custo Combustível (\$)	3103,65
Custo Carbono (\$/MWh)	22,7
Custo Carbono (\$)	2.587,80
Potência (MWe)	114,00
Potência (KW)	114.000
CAPEX (\$/KW)	1.130
Investimento Inicial Total ('000)	128.763.000
Tempo do projeto (anos)	25
Taxa de Desconto	8,00%

Para os custos do SMR, os valores foram obtidos através de adaptações dos custos de um reator padrão do tipo PWR de 1144 MW, com as premissas expostas na tabela 10.

Tabela 10. Adaptações de custos de um reator PWR para um SMR (Fonte: Produzido pelo autor, 2022)

Cost Details	Nuclear Power Plant Systems	Change	Assumptions	Reference PWR		OPEN100	
				Total \$/kW	Total \$/MWt	Total \$/kW	Total \$/MW
Direct Construction Costs	Electric System	SCALE	Scale with size	\$223.00	\$2.01	\$223.00	\$2.01
	Heat Rejection System	SCALE	Scale with size	\$105.00	\$0.95	\$105.00	\$0.95
	Nuclear Steam Supply System	DIFFER	Use chemical industry supply chain	\$344.00	\$3.10	\$69.00	\$0.62
	Other Plant Systems	SCALE	Scale with size	\$130.00	\$1.17	\$130.00	\$1.17
	Other Reactor Systems	DIFFER	Remove NQA-1 stamp requirement	\$274.00	\$2.47	\$55.00	\$0.50
	Plant Buildings	DIFFER	Serious Consolidation	\$588.00	\$5.30	\$294.00	\$2.65
	Reactor Instrumentation and Controls	DIFFER	Physically less cabling, modern digital equip.	\$45.00	\$0.40	\$9.00	\$0.08
	Reactor Safeguards System	DIFFER	Remove NQA-1 stamp requirement	\$48.00	\$0.43	\$10.00	\$0.09
Indirect Services Costs	Turbine System	SCALE	Scale with size	\$498.00	\$4.49	\$499.00	\$4.50
	Other Indirect Services	DIFFER	Break from Standard EPC Model	\$791.00	\$7.13	\$379.00	\$3.42
	Project Management Services	DIFFER	Break from Standard EPC Model	\$809.00	\$7.29	\$459.00	\$4.14
Other Overnight Construction Costs	Site-Specific Design Services	DIFFER	Break from Standard EPC Model	\$912.00	\$8.22	\$420.00	\$3.78
	Decommissioning	DIFFER	Reduction based on PRA assesment	\$38.00	\$0.34	\$4.00	\$0.03
	Land, Studies, Permits	DIFFER	Build on existing site	\$132.00	\$1.19	\$13.00	\$0.12
	Other Supplementary Costs	SAME	No change	\$40.00	\$0.36	\$40.00	\$0.36
Operating Costs	Staff Recruitment, Training, Housing	DIFFER	Staffing concept overhaul	\$715.00	\$6.44	\$71.00	\$0.64
	Fuel Purchases	SAME	No change		\$5.23		\$5.23
	Operating Fees	ELIM	Adjusted for intrnl regulatory standards		\$0.31		\$0.03
	Other O&M Costs	DIFFER	Reductions via modern workforce norms		\$14.54		\$2.91
	Spent Fuel Storage and Reproc	DIFFER	Reduced requirement based on SF dilution		\$2.82		\$0.56
Staff	DIFFER	Significant reduction via digital control panel		\$6.68		\$1.34	
Resumo Geral:				\$5,692.00	\$80.87	\$2,780.00	\$35.13

6. Conclusões e Perspectivas

Os resultados estão todos registrados na tabela 11: o custo em \$/kwh para uma usina a gás em países membros e não membros da OCDE, e para uma usina a carvão em países membros e não membros da OECD e por fim de um SMR.

Tabela 11. Resultados LCOE (Fonte: Produzido pelo autor, 2022)

Gás Natural	OCDE	Sem Carbono	\$ 126,66
		Com Carbono	\$ 151,12
	NOCDE	Sem Carbono	\$ 119,64
		Com Carbono	\$ 144,23
Carvão	OCDE	Sem Carbono	\$ 153,20
		Com Carbono	\$ 224,46
	NOCDE	Sem Carbono	\$ 124,41
		Com Carbono	\$ 191,18
Nuclear	SMR		\$ 40,68

Os resultados encontrados vieram dentro dos valores esperados e ilustram a já conhecida competitividade econômica da geração nuclear em relação as modalidades de geração fósseis trazidas.

O trabalho chega a conclusão de que, além das diversas vantagens mencionadas em seções anteriores, os SMRs também apresentam atratividade econômica, e por isso podem desempenhar um papel essencial no cenário de transição energética para fontes não poluentes ilustrado no início do trabalho.

Apesar dos resultados satisfatórios, os dados utilizados são baseados em aproximações teóricas, uma vez que ainda existem poucos SMRs em operação e com isso a falta de dados reais experimentais, que só serão conhecidos com a retomada do investimento na indústria nuclear e desenvolvimento de projetos com SMRs.

Agradecimentos

Agradeço, em primeiro lugar, aos meus pais, por me proporcionarem sempre as melhores oportunidades e por me ensinarem o valor dos estudos.

À minha avó, *in memoriam*, e minha irmã por terem sido minhas duas maiores incentivadoras.

Aos meus amigos, por sempre agregarem e me apoiarem durante essa trajetória.

Aos meus colegas de curso, pelo companheirismo durante esses árduos anos e incontáveis horas de estudo.

Aos meus professores e orientadores, por todo conhecimento transmitido e pelos valiosos conselhos.

Por fim, à minha namorada, por todo apoio e estímulo dado nessa etapa final.

Referências Bibliográficas

AQUECIMENTO Global de 1,5°C - PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE mudanças climáticas, 2018. Disponível em: < <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/07/SPM-Portuguese-version.pdf>>. Acesso em 22 jul. 2022.

CARBONOMICS: Security of Supply and the Return of Energy Capex – Goldman Sachs, março 2022. Disponível em: < <https://www.goldmansachs.com/insights/pages/carbonomics-security-of-supply-and-the-return-of-energy-capex.html>>. Acesso em 19 set. 2022.

DOE/EIA, International Energy Outlook 2011, DOE/EIA – 0484, 2011. Disponível em: < <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/>>. Acesso em 22 jul. 2022.

HAYNS, M. R., SHEPARD, J. **SIR-Reducing Size Can Reduce Cost**, Nuclear Energy. 30 (1991) 85-93.

LOCATELLI, Giorgio; MIGNACCA, Benito. **UNIVERSITY OF LEEDS, SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING, LEEDS, YORKSHIRE, UNITED KINGDOM-** Small Modular Nuclear Reactors. Acesso em 09 agost. 2022.

LOCATELLI, G; BINGHAM; C and MANCINI, M. **Small modular reactors: A comprehensive overview of their economics and strategic aspects.** 2014.

NUCLEAR Power in a Clean Energy System – International energy agency, maio 2019. Disponível em: < https://studentenergy.org/source/nuclear/?gclid=CjwKCAjw-rOaBhA9EiwAUkLV4vw7NXvsf5EhtBeaNFaBluw8Osup_v0FC-XW4PrqW6kmhFICspuiDhoCvgcQAvD_BwE>. Acesso em 02 set. 2022. .

NUCLEAR Energy in the Circular Carbon Economy (CCE), A Report to the G20, Nuclear Energy Agency, 2021. Disponível em: < https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_60575/nuclear-energy-in-the-circular-carbon-economy-cce>. Acesso em 02 set. 2022.

OECD-NEA, Current Status. **Technical Feasability and Economics of Small Nuclear Reactors**, 2011.

OPEN 100. Disponível em: <<https://www.open-100.com/>>. Acesso em 22 jul. 2022.

PROJECTED Costs of Generating Electricity – International Energy Agency, 2020.