



The renewable energy sources that can contribute to low- or zero-carbon emissions from nuclear power systems

C. P. Ricardo¹, M. J. M. Zapata², and A.
H. de Oliveira³

¹*carlapr@ufmg.br*

²*mmzapata@fisica.ufmg.br*

³*heeren@nuclear.ufmg.br*

^{1,2,3} *Universidade Federal de Minas Gerais*
Avenida Pres. Antônio Carlos, 6627, Campus
da UFMG - Pampulha. CEP 31270-901
Belo Horizonte, MG, Brasil

1. Introduction

Energy production in whole world has a fundamental role in maintaining and improving lifestyles, providing well-being to humanity, in addition to being necessary in all sectors: industrial, domestic, commercial, transportation, power generation [1]. With the increase in global energy demand, resulting from the increase in population, as well as the lifestyle that consumes more electronics each day, there is a persistent need to expand the energy generation infrastructure. This expansion entails the need to replace fossil fuels that emit carbon dioxide (CO₂) with alternative energy sources, such as renewable energy and nuclear, to reduce greenhouse gas (GHG) emissions. Therefore, research has been directed towards the study of the chemical storage of intermittent solar and wind energy. [2], the reduction of net CO₂ emissions in the energy generation processes, leading to global analysis of these processes and by the sequestrate CO₂, especially through CO₂ capture [1], the improvement in the evaluation of the technical and economic potentials of the energy generation plants [3], among others.

The energy mix in many countries is shifting towards alternative energy sources, such as renewable energy and nuclear, with the intention of replacing the use of energy. fossil fuel, that has been the main source of energy since decades [4]. Nuclear energy, although it doesn't emit greenhouse gases in the heat and electricity generation stages, isn't a zero-emission carbon energy source. Its global system, start with uranium mining, through the fuel cycle, until finish in the energy generation phase, receives, in practice, a substantial energy inputs throughout the process, provided by fossil sources [5]. Lenzen's meta-analysis shows that the most popular reactor types, LWR and HWR, need between 0.1 and 0.3 kWh_{th} and, on average, about 0.2 kWh_{th} for every kWh of electricity generated. These energy intensities result into greenhouse gas emissions by LWR and HWR between 10 and 130 g CO_{2-e} / kWh_{el}, with an average of 65 g CO_{2-e} / kWh_{el}. Putting in an increasing order of greenhouse gases emissions, there are wind turbines and hydroelectricity (about 15–25 g CO_{2-e} / kWh_{el}), followed by solar photovoltaic or solar thermal energy (about 90 g CO_{2-e} / kWh_{el}), the nuclear systems and finally fossil technologies (between 600-1200 g CO_{2-e} / kWh_{el}).

This article intends to show research on renewable energy sources over the last five years that can help to provide energy for nuclear systems, making them have a global low-to-near-zero CO₂ level, using a review of the literature.

2. Methodology

For this study, a bibliographic survey was carried out in the Web of Science database. The database search was performed using the following terms: (i) Topic: Renewable energy sources; (ii) Title of publication: Nature *; (iii) Year of publication: 2021, 2020, 2019, 2018, 2017; which returned fifty-five articles, which were used in the study of different types of renewable energies, giving relevance to the most cited.

3. Results and Discussion

Here you show your results in a compact fashion and give a brief discussion.

According to the World Energy Outlook 2020 report, prepared by the IEA, the current energy generation market uses as renewable energy sources a matrix consisting of Hydroelectric Energy, Photovoltaic Solar Energy, Wind Energy, Bioenergy, Geothermal Energy and Solar Energy, and points out as promising the use of Concentrated Solar Energy (CSP) and Hydrogen as fuel (IEA, 2020). As shown in Figure 1, in the last two years the contribution of renewable sources to the global energy matrix has grown, unlike other non-renewable sources, whose contribution has decreased, includes the nuclear, probably by politics decisions.

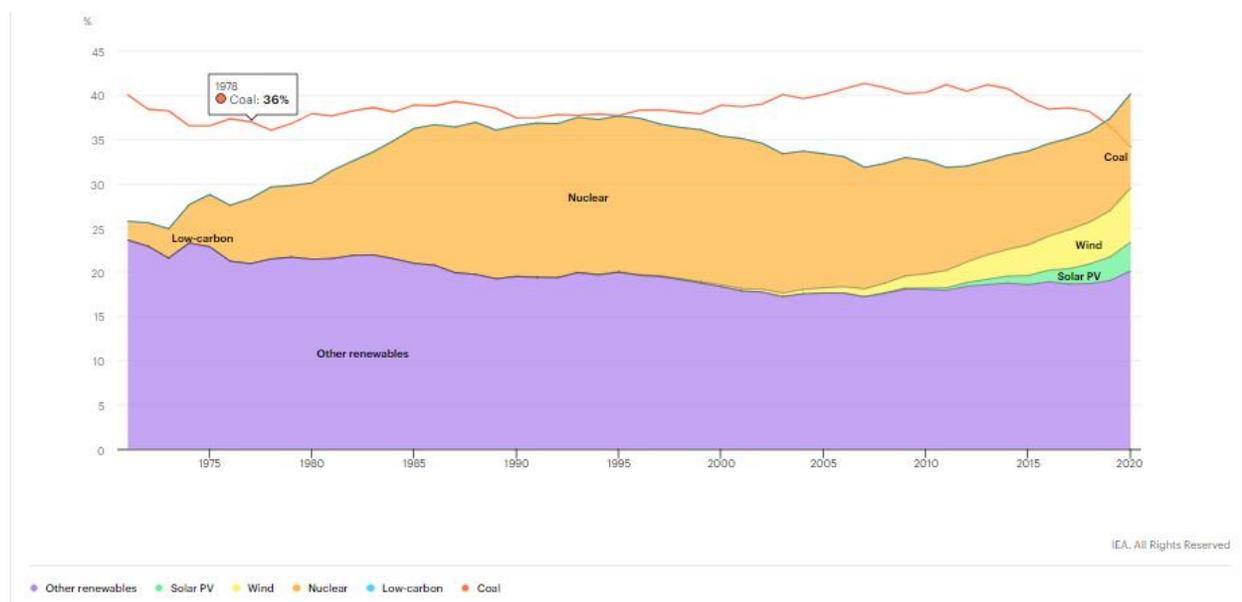


Figura 5 - IEA, Global generation shares from coal and low-carbon sources, 1971-2020, IEA, Paris

As pesquisas mais recentes levantadas na base de dados Web of Science demonstram um crescimento a cada ano nas pesquisas dentro da área de “fontes de energias renováveis”, considerando que 2021 ainda está em curso, e o número de publicações ainda poderá aumentar (Figura 6).

Figura 6 - Nº de publicações por ano - Renewable energy sources (Web of Science)

Essas publicações, quando classificadas em função da área de pesquisa, destacam as seguintes categorias:

Ciências dos Materiais (21), Ciências Multidisciplinares (20), Combustíveis (16), e Química (12), conforme observado na Figura 7 abaixo.

Figura 7 - Nº de publicações por categoria do Web of Science

Dentre os principais países que vem desenvolvendo pesquisas de destaque na área de fontes de energias renováveis, mostrados na Figura 8, podemos citar os Estados Unidos da América, majoritariamente, seguido pela China, Inglaterra, Alemanha e Holanda, sendo que o Brasil e nenhum outro país da América do Sul aparecem na análise da busca, o que torna os pesquisadores dessa área no Brasil verdadeiros pioneiros.

Figura 8 - Países que publicaram de 2017 a 2019 na Nature * tópicos sobre Fontes de Energia Renováveis. No cenário global, as principais fontes, cuja estimativas preveem crescimento na composição da matriz de energias renováveis são: Biomassa sólida, Biocombustíveis Líquidos, Biogás e Produção de hidrogênio com baixa emissão de carbono, independente do cenário de crescimento, conforme demonstrado na Figura 9, por tipo de combustível. E considerando um cenário extremamente positivo, a Figura 10 mostra como ocorreria a expansão por fonte de energia renovável, e a Figura 11 mostra a mesma expansão da figura anterior, em função das regiões do mundo.

Figura 9 - IEA, Global supply of low-carbon fuel by scenario, 2019-2040, IEA, Paris

Figura 10 - IEA, Renewables 2019 accelerated case expansion above main case, by technology, IEA, Paris

Figura 11 - IEA, Renewables 2019 accelerated case expansion above main case, by region, IEA, Paris
A Figura 12 mostra a projeção de demanda por tipo de energia, em um cenário menos otimista, demonstrando que, irrefutavelmente, a demanda por energias renováveis tende a crescer ao longo dos anos.

Figura 12 - IEA, Key fuel trends in the Stated Policies Scenario, 2019-2030, IEA, Paris

2.1. Energia Hidrelétrica

A energia hidrelétrica continua a ser a maior fonte renovável de eletricidade, apesar da energia solar ser o principal impulsionador do crescimento das fontes de energias renováveis no último ano uma vez que estabelece novos recordes de implantação a cada ano, seguida pela energia eólica onshore e offshore. As projeções para o ano 2024 mostram um aumento na capacidade de 9% (121 GW), liderado pela China, Índia e Brasil. Espera-se que um quarto do crescimento global venha de apenas três megaprojetos: dois na China (16 GW em Wudongde e 10 GW em Baihetan) e um na Etiópia (6,2 GW) (IEA, 2020).

Figura 13 - IEA, Hydropower and pumped storage hydropower annual additions, main and accelerated, 2013-2024, IEA, Paris

Segundo Gernaat et. al (2017), a energia hidrelétrica atualmente fornece 16% da eletricidade total do mundo e mais de 72% de toda a eletricidade renovável da matriz global. É uma excelente alternativa ao

uso de combustíveis fósseis, pois sua produção é confiável, principalmente pela flexibilidade e capacidade de armazenamento de energia, podendo suprir o fornecimento intermitente de fontes solar e eólica. Os autores destacam que o potencial futuro das hidrelétricas deve ser melhor estudado, com dados mais confiáveis, análises mais precisas, ressaltando que os levantamentos de potenciais futuros da energia hidrelétrica estão aquém dos levantamentos feitos para outras fontes de energia renováveis, principalmente a solar e a eólica.

Os autores criticam a limitação do uso de estimativas globais do Hydropower Atlas para estudos dos modelos de economia de energia e publicações sobre energia e mudanças climáticas, ao invés de se utilizar uma metodologia global consistente, o que pode levar a equívocos (Gernaat et. al, 2017).

Ainda sobre a energia hidrelétrica, Almeida et al. (2019), ao analisar as o cenário da bacia amazônica, onde centenas de barragens foram propostas, ressaltou que alguns projetos de usinas podem emitir grandes quantidades de gases do efeito estufa (GEE) por unidade de eletricidade gerada (Intensidade de Carbono), mesmo sabendo-se que a energia hidrelétrica é considerada uma fonte potencialmente limpa de energia renovável. No seu trabalho, Almeida et al. Compara as intensidades de carbono das usinas propostas com as intensidades de outras fontes, como a eólica, a solar e combustíveis fósseis. Algumas usinas hidrelétricas propostas para serem instaladas na bacia amazônica se mostraram equivalentes às plataformas eólicas e solar, sendo pouco emissoras de GEE (~39 kg CO₂ eq MWh⁻¹). Entretanto, outras usinas se mostraram com capacidade mais poluente do que usinas de combustíveis fósseis (~133 kg CO₂ eq MWh⁻¹).

2.2. Energia Fotovoltaica

A energia fotovoltaica (PV) distribuída tem o maior potencial para crescimento acelerado na produção de energia, especialmente para o fornecimento de energia para aplicações comerciais. Em um número crescente de países onde a eletricidade não é subsidiada, os custos de geração de energia solar fotovoltaica estão diminuindo para se tornarem comparáveis aos preços variáveis de eletricidade no varejo, tornando essa fonte de energia mais atraente (IEA, 2020).

De acordo com o levantamento global feito pela IEA (2020), as usinas em escala de serviço público devem representar 55% da expansão total da energia solar fotovoltaica, sendo a China a responsável por mais de 40% do crescimento global fotovoltaico, seguida pela União Europeia e os Estados Unidos, que demonstram similar expansão da capacidade nos próximos seis anos. Com a energia solar fotovoltaica se tornando mais economicamente atrativa, o crescimento se acelera na América Latina, Eurásia, Oriente Médio e África.

Figura 14 - IEA, Solar PV annual additions by segment, main and accelerated, 2013-2024, IEA, Paris

As pesquisas nessa área que possuem destaque neste levantamento buscam possibilitar o armazenamento barato, confiável e acessível da energia, para diminuir o impacto das variações na oferta de energia decorrentes das flutuações sazonais na produção ou demanda de eletricidade (Mouli-Castillo et al 2019, Stephen Comello 1 & Stefan Reichelstein, 2019, Sheberla et al. 2017, Kittner, 2017; Li, 2019)

Os pesquisadores Stephen Comello e Stefan Reichelstein (2019) discutiram em seu trabalho a importância do armazenamento de energia para estabilizar o fornecimento de energias renováveis, seja ela fotovoltaica ou de outras fontes. Eles propuseram uma métrica para avaliar o custo nivelado de armazenamento de energia (preço mínimo por kWh do armazenamento de energia). Baseando-se em um sistema que utiliza baterias de íons de lítio, acoplado a um sistema fotovoltaico aplicado em residências na Alemanha, os autores definiram como economicamente viável o armazenamento retroativo. Esta viabilidade decorre das diferenças tarifárias da Alemanha, e compara com o sistema subsidiado pelo governo, como acontece na

Califórnia.

2.3. Energia Eólica

A capacidade eólica onshore está prevista para expandir 57%, para 850 GW até 2024 na previsão do caso principal. As adições anuais de energia eólica onshore chegam a quase 60 GW em 2020, resultado de uma corrida de desenvolvimento nos Estados Unidos antes do PTC ser eliminado, e na China, da política de transição de FITs para leilões competitivos. Espera-se que as instalações anuais globais sejam menores (cerca de 50 GW) de 2021 a 2024, já que o crescimento será mais lento na China e nos Estados Unidos. A expansão acelera na União Europeia, no entanto, à medida que os leilões competitivos continuam a manter os custos relativamente baixos. Na América Latina, região MENA, Eurásia e África Subsaariana, o cronograma de leilões garante um crescimento estável ao longo do período previsto. Integração da rede, financiamento e aceitação social são os principais desafios para uma expansão eólica onshore mais rápida em todo o mundo.

Figura 15 - IEA, Onshore and offshore wind annual additions, main and accelerated, 2013-2024, IEA, Paris

A capacidade eólica offshore está prevista para aumentar quase três vezes (+43 GW) para 65 GW em 2024, produzindo quase 10% da geração eólica mundial total. Embora a União Europeia seja responsável por metade da expansão global da capacidade eólica offshore em 2019-2024, por país, a China lidera a implantação, com 12,5 GW em desenvolvimento por meio de vários projetos com apoio político contínuo no âmbito do esquema FIT. Fora da China, os preços de contrato de baixo recorde levam à expansão no Reino Unido, Dinamarca, Holanda e Alemanha, com várias rodadas de leilão já finalizadas com contratos de subsídio zero. As primeiras grandes adições de capacidade nos Estados Unidos também devem entrar em operação durante o período de previsão, seguidas pelas de Taipé Chinês.

Além desses três grandes projetos, no entanto, novas adições de capacidade continuam a diminuir durante o período de previsão. Isso se deve em grande parte à desaceleração nos dois maiores mercados, China e Brasil, onde o crescimento é desafiado pelo aumento dos custos de investimento devido à limitação dos locais econômicos remanescentes e aos gastos extras para lidar com os impactos sociais e ambientais.

2.4. Bioenergia

A capacidade de bioenergia aumenta 32%, para 171 GW até 2024. Embora isso represente apenas 3% do crescimento total da capacidade renovável, a bioenergia é, no entanto, responsável por 8% da geração renovável no final do período de previsão. As adições globais permanecem estáveis em 6 GW a 8 GW, com a China fornecendo mais de 50% da nova capacidade, principalmente na forma de projetos de cogeração de biomassa sólida e energia a partir de resíduos (EfW).

Figura 16 - IEA, Bioenergy installed capacity growth, main and accelerated case, 2019-2024, IEA, Paris

Brasil e Índia são os próximos maiores mercados em crescimento por causa da cogeração a partir do bagaço, ligada à indústria de açúcar e etanol. Na União Europeia, o recorde de 3 GW de adições em 2018 (o maior desde 2011) não é atingido novamente. A capacidade europeia aumenta pouco menos de 6 GW durante todo o período de previsão, liderada pelo Reino Unido, Holanda e Turquia, devido ao seu mercado emergente de biogás.

2.5. Geotérmica

A capacidade geotérmica deve crescer 28%, atingindo 18 GW até 2024, com a Ásia responsável por um terço da expansão global, principalmente por meio de projetos atualmente em construção na Indonésia e nas Filipinas, seguida pelo Quênia, cuja capacidade geotérmica cumulativa deve ultrapassar Islândia durante o período de previsão. Os riscos do estágio de pré-desenvolvimento continuam a ser um desafio importante, impedindo o rápido desenvolvimento do potencial geotérmico inexplorado.

Figura 17 - IEA, Geothermal installed capacity growth, main and accelerated case, 2019-2024, IEA, Paris

2.6. Solar e Hidrogênio

Prevê-se que a capacidade global de CSP aumente 60% para 9 GW até 2024 no caso principal, liderado pela China e implantação na região MENA, mas as tecnologias marítimas se expandem apenas ligeiramente para atingir 0,6 GW com projetos piloto e de pequena escala.

reação de Sabatier (isto é, metanação de CO₂) está passando por um renascimento por duas razões principais. Primeiro, o conceito de energia para gás oferece a perspectiva de reciclagem em grande escala das emissões de CO₂ (fonte pontual), em combinação com o uso de grandes quantidades de energia renovável para formar metano. Quando isso pode ser alcançado de forma econômica, pode-se usar a distribuição de gás infraestrutura que já existe. No entanto, a metanação não é uma panacéia simples para o efeito ambiental prejudicial do CO₂ emissões e produtos de reação diferentes do metano também devem ser visados. Em segundo lugar, a metanação foi identificada como uma reação importante para facilitar missões de exploração espacial de longo prazo por agências espaciais, como a NASA. Esta Perspectiva discute a compreensão atual da hidrogenação de CO₂ dentro desses conceitos, de aspectos mecânicos fundamentais para vários parâmetros que acabarão por definir sua viabilidade técnica e econômica na Terra e no espaço, à medida que fazemos a transição para a era da ativação de pequenas moléculas. (Vogt et al. 2019)

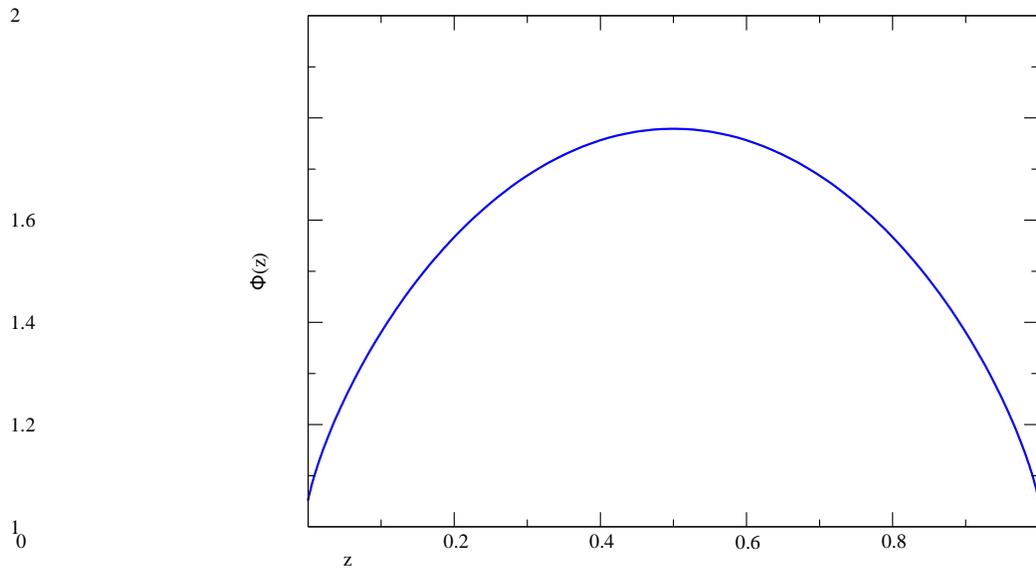


Figure 1: A solution to the one-dimensional slab geometry integral equation using 256-point Gauss-Legendre quadrature.

See Table I for an example of a table. The caption appears above the table, which must be centered on the page and numbered in Roman numerals.

Table I: A table example that you should format to your own tastes.

Heading	Columns of Numbers	
1	100.0	2.0
2	$1.0 \cdot 10^{-4}$	0.40

3. Results and Discussion

Here you show your results in a compact fashion and give a brief discussion.

4. Conclusions

A summary and conclusions might go here.

Acknowledgements

The L^AT_EX format has been prepared by Professor Helio Pedro Amaral Souto, Instituto Politécnico (IPRJ), Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Brazil.

References

- [1] A. Author, “Article,” *Journal Name*, vol. 1, pp. 1–199 (2013).
 - [2] A. Author, “Paper,” *Proceedings of Meeting*, Location, Dates, vol. 1, pp. 5209–5314 (2013).
 - [3] A. Author, *Book Title*, Publisher, City & Country (2013).
 - [4] “A Website for Everything,” <http://this.is.not.a.site/nothing> (2013).
-
- [1] King; van den Bergh, 2018
 - [2] Zhong et. al, 2020
 - [3] (Gernaat et. al, 2017)
 - [4] Saeed Ahmed, Anzar Mahmood, Ahmad Hasan, Guftaar Ahmad Sardar Sidhu, Muhammad Fasih Uddin Butt, A comparative review of China, India and Pakistan renewable energy sectors and sharing opportunities, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 57, 2016, Pages 216-225, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.191>.
 - [5] Manfred Lenzen, Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review, *Energy Conversion and Management*, Volume 49, Issue 8, 2008, Pages 2178-2199, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.01.033>.