

## ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE DAS FONTES DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL: UM ESTUDO COMPARATIVO COM BASE EM INDICADORES

Pedro Henrique Silva Rodrigues<sup>1</sup>

Arthur Reis Martins<sup>1</sup>

Roberto Asano Junior<sup>1</sup>

Douglas Bellini<sup>1</sup>

Ricardo Drudi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do ABC

DOI: 10.47168/rbe.v30i3.938

### RESUMO

Encontrar a matriz elétrica ideal de um país é um desafio complexo que envolve aspectos econômicos, sociais e ambientais. A análise das alternativas de geração de energia elétrica, considerando suas vantagens e desvantagens, é essencial para um modelo sustentável e resiliente. Indicadores de sustentabilidade são cruciais para avaliar essas opções, permitindo uma comparação robusta e científica. Este estudo propõe indicadores para analisar as fontes de energia, fornecendo subsídios para decisões no planejamento energético. Com base em uma revisão bibliográfica, foram selecionados indicadores consistentes, mensuráveis e independentes, abrangendo aspectos econômicos, tecnológicos, ambientais e sociais. Alguns dos indicadores utilizados foram o custo de eletricidade, capacidade de resposta à demanda, uso do solo, consumo de água, externalidades, geração de empregos e aceitação pública. Após a normalização dos dados e atribuição de pesos em uma análise multicritério, a pontuação final das tecnologias foi obtida. Hidrelétrica, nuclear e eólica onshore se destacaram positivamente, enquanto carvão e biomassa tiveram as piores pontuações. Portanto, este estudo demonstra que o uso de indicadores de sustentabilidade facilita a comparação entre fontes de energia e apoia decisões fundamentadas para a escolha de opções alinhadas com critérios de sustentabilidade, contribuindo para um modelo energético mais sustentável.

Palavras-chave: Indicadores de sustentabilidade; Planejamento energético; Decisão multicritério.

## ABSTRACT

Finding a country's ideal electricity matrix is a complex challenge that involves economic, social and environmental aspects. Analysing electricity generation alternatives, considering their advantages and disadvantages, is essential for a sustainable and resilient model. Sustainability indicators are crucial for evaluating these options, allowing for a robust and scientific comparison. This study proposes indicators to analyse energy sources, providing input for decisions in energy planning. Based on a literature review, consistent, measurable and independent indicators were selected, covering economic, technological, environmental and social aspects. Some of the indicators used were the cost of electricity, demand response capacity, land use, water consumption, externalities, job creation and public acceptance. After normalising the data and assigning weights in a multi-criteria analysis, the final score of the technologies was obtained. Hydroelectric, nuclear and onshore wind stood out positively, while coal and biomass had the worst scores. Therefore, this study demonstrates that the use of sustainability indicators facilitates comparison between energy sources and supports informed decisions for choosing options in line with sustainability criteria, contributing to a more sustainable energy model.

Keywords: Sustainability indicators; Energy planning; Multi-criteria decision-making.

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil ostenta uma matriz elétrica singular, caracterizada pela predominância da geração hidrelétrica que, em 2022, atingiu a marca de 61,9% da oferta interna de energia elétrica. No entanto, uma diversificação gradual vem se desenhando, impulsionada principalmente pela implementação de usinas eólicas e solares fotovoltaicas, que atingiram 23,8 GW e 24,5 GW, respectivamente, de capacidade instalada (EPE, 2023).

Embora a geração termelétrica tenha diminuído 32,3%, devido ao aumento dos níveis dos reservatórios das principais hidrelétricas do país, a biomassa e o gás natural continuam a ser importantes fontes na geração elétrica no Brasil. A biomassa, composta principalmente de bagaço de cana e lixo, responde por 8,0% da oferta interna de energia elétrica. Já o gás natural representa 6,1% da oferta. Juntas, essas duas fontes respondem por 70,2% de toda a geração termelétrica do país (EPE, 2023).

A diversificação da matriz elétrica brasileira, com opções desde a geração centralizada de grande porte até a geração distribuída de

pequeno porte, abre caminho para a discussão sobre qual modelo energético é o mais adequado para o país. Encontrar a matriz ideal para o país se configura como um desafio multifacetado, envolvendo ponderações sobre os aspectos econômicos, sociais e ambientais. A análise aprofundada das diversas alternativas, considerando suas vantagens e desvantagens, é fundamental para a construção de um modelo sustentável e resiliente (CESARETI, 2010).

Diante da complexa tarefa de encontrar a matriz ideal, surge a necessidade de analisar criticamente as diversas alternativas disponíveis, considerando seus prós e contras. Uma grande quantidade de trabalhos de avaliação dos indicadores de sustentabilidade para fontes de geração de eletricidade com resultados divergentes pode ser encontrado nas bases de dados acadêmicas, ressaltando a dificuldade estabelecida pela ausência de metodologia amplamente aceita (CESARETI, 2010).

O uso de indicadores de sustentabilidade adequados é crucial para avaliar e comparar as diversas opções de geração de energia, considerando as diferentes particularidades que impactam a sustentabilidade ambiental, social e econômica do sistema energético. O estudo que será apresentado neste trabalho contribui para essa discussão ao propor um conjunto de indicadores que permite uma análise científica robusta das fontes de energia, fornecendo subsídios valiosos para a tomada de decisões no planejamento energético do país.

Este estudo selecionou indicadores baseando-se em quatro dimensões distintas - econômica, tecnológica, ambiental e sociopolítica - a fim de avaliar e distribuir dez indicadores de sustentabilidade. Esses indicadores compreendem aspectos cruciais, tais como custo nivelado de eletricidade, capacidade de resposta à demanda, fator de capacidade, uso do solo, consumo de água, externalidades ambientais, externalidades sociais, geração de empregos, aceitação pública e risco de dependência energética externa. Essa estrutura multifacetada proporciona uma análise abrangente, incorporando diversas perspectivas e considerando variáveis cruciais para uma avaliação completa e equilibrada da sustentabilidade.

A partir de uma revisão bibliográfica, este trabalho selecionou indicadores que fossem ao mesmo tempo consistentes, comparáveis para as tecnologias de geração de energia elétrica mais relevantes no Brasil, mensuráveis, independentes e que abrangessem um determinado tema da maneira mais sistemática possível. Finalmente, após a coleta de dados, é realizada uma normalização desses dados e uma atribuição de pesos que são utilizados para balancear os indicadores e apresentar uma classificação das tecnologias mais sustentáveis dentro dos parâmetros escolhidos. A pontuação final de cada tecnologia é obtida através da soma dos valores normalizados

dos indicadores, multiplicados pelos respectivos pesos em uma análise multicritério.

Nas próximas seções serão apresentados os indicadores utilizados, a matriz dos indicadores estudados, os resultados obtidos e, por fim, as conclusões gerais do trabalho.

## 2. APRESENTAÇÃO DOS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE

O estudo utilizou quatro dimensões para distribuir os 10 indicadores de sustentabilidade: econômico, tecnológico, ambiental e sociopolítico. Nas Tabela 1, são mostrados os valores destes indicadores para as esferas econômicas, tecnológica e ambiental.

Para a esfera econômica, o custo nivelado de eletricidade foi utilizado como indicador. Seus cálculos levam em consideração os custos de investimento, operação e os custos de manutenção, custos de combustível, custos de descomissionamento. O relatório *Projected Costs of Generating Electricity*, publicado em 2010 pela Agência Internacional de Energia Nuclear (NEA), Agência Internacional de Energia (IEA) e a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) exibe o custo nivelado de eletricidade para cerca de 200 plantas de geração de eletricidade localizada em 21 países (NEA; IEA; OCDE, 2010).

Na esfera tecnológica, a resposta à demanda e o fator de capacidade foram utilizados. O trabalho do Breeze (2019) foi utilizado como referência aos dados de resposta à demanda, enquanto o indicador de fator de capacidade foi obtido dos trabalhos de IEA (2011) e NEA, IEA e OCDE (2010).

Na esfera ambiental, foram escolhidos os indicadores de ocupação de solo, consumo de água e externalidades ambientais. A fim de produzir uma comparação justa de tecnologias, levamos em consideração o uso da terra ao longo de todo o ciclo de vida das usinas: a extração, processamento, transporte e eliminação de resíduos de combustíveis, além de considerar a construção, operação e desmantelamento da central de energia; os dados foram obtidos do trabalho de Fthenakis e Kim (2009). Assim como a ocupação do solo, a minimização do consumo de água também foi considerada crítica pelos autores. Neste caso, os valores de consumo apresentados por Fthenakis e Kim (2010) foram utilizados para avaliar as diversas tecnologias de geração de eletricidade sob a ótica deste indicador.

Para as externalidades usamos como referência o trabalho da Comissão Europeia (Comissão Europeia, 2005) que financiou um projeto de investigação em grande escala sobre o tema dos custos externos, chamado *ExternE*. O estudo ajudou a desenvolver uma metodologia abrangente para a avaliação monetária dos impactos

negativos que a geração de eletricidade pode ter na sociedade e no meio ambiente.

Tabela 1 - Indicadores utilizados, com seus respectivos valores, para as esferas econômicas, tecnológicas e ambientais

Fontes	Econômico	Tecnológico		Ambiental		
	Custo Normalizado	Resposta a Demanda	Fator de Capacidade	Ocupação do Solo	Consumo de Água	Externalidades Ambientais
Gás Natural	78,06	Rápida	0,85	0,31	2300	3,200
Hidroelétrica de Grande Porte	26,35	Rápida	0,54	4,10	80	0,330
Eólica (onshore)	76,28	Não	0,27	1,57	170	0,083
Biomassa	72,00	Lenta	0,70	12,65	2000	0,750
Eólica (offshore)	128,68	Não	0,40	2,76	230	0,083
Nuclear	53,79	Lenta	0,85	1,12	3200	3,200
Carvão	64,37	Lenta	0,85	0,39	2500	7,750
Solar	177,8	Lenta	0,45	0,46	1900	0,162

Para a esfera sócio-política, quatro indicadores foram utilizados: externalidades sociais, criação de empregos, aceitação pública e dependência externa, conforme pode ser observado na Tabela 2.

Em relação ao indicador de externalidades sociais, este é um dos indicadores sociopolíticos, também desenvolvido pela Comissão Europeia, para avaliar o impacto da produção de eletricidade na saúde humana, e foi utilizado neste trabalho com a mesma abordagem que os custos externos ambientais (MAXIM, 2014).

O indicador de criação de empregos fornece uma avaliação do ciclo de vida que mostra o número de trabalhadores envolvidos na implementação e operação de um projeto de geração de energia elétrica. Os valores foram calculados usando os dados fornecidos em um estudo realizado por Navigant Consulting (2009).

A aceitação pública é usada como um indicador de sustentabilidade e está relacionado à “percepção de risco” da tecnologia. Este indicador foi avaliado utilizando os resultados de três estudos de grande repercussão e com uma ampla cobertura geográfica. O primeiro é uma edição especial da Eurobarometer (2007), com 24.815 participantes, que abordou a população dos países da UE-25 cujos resultados foram reconfirmados por outras pesquisas recentes. O segundo é um estudo conduzido por Greenberg (2009) nos EUA com 2.701 pessoas. E o terceiro é um estudo publicado pela Affairs (2010), que abrange os EUA e 22 outros países de vários continentes, com 23.000 pessoas.

Tabela 2 - Indicadores utilizados, com seus respectivos valores, para a esfera sócio-política

Fontes	Externalidades Sociais	Criação de Empregos	Aceitação Pública	Dependência Externa
Gás Natural	0,8	0,11	Média	9,8
Hidroelétrica de Grande Porte	0,67	0,55	Média	0
Eólica ( <i>onshore</i> )	0,168	0,17	Alta	0
Biomassa	4,25	0,21	Alta	0
Eólica ( <i>offshore</i> )	0,168	0,17	Alta	0
Nuclear	0,574	0,14	Baixa	1,8
Carvão	7,65	0,11	Baixa	1,6
Solar	0,438	0,23	Alta	0

Por fim, o indicador dependência externa tem como chave a segurança energética. A segurança energética exige que em qualquer momento haja energia suficiente no mercado para satisfazer toda a demanda existente, a um preço razoável. O estudo de Coq e Paltseva (2009) foi escolhido, pois avalia separadamente vários tipos de combustíveis. O documento também utiliza uma série de medidas de avaliação de risco, por exemplo, diversificação de fornecedores, o risco de trânsito, a fungibilidade do abastecimento, etc.

### 3. METODOLOGIA

No contexto dos indicadores que apresentam valores absolutos, realizou-se uma normalização desses valores entre 0 e 1. Essa abordagem permitiu equalizar os indicadores, que inicialmente possuíam valores absolutos bastante distintos, conferindo-lhes o mesmo peso durante a comparação entre as tecnologias. Dessa forma um método de relativização dos valores absolutos dos indicadores foi utilizado, no qual foi privilegiada a proporção relativa entre os valores absolutos dos indicadores. As equações utilizadas para esse nivelamento dos valores dos indicadores são apresentadas na Tabela 3, nas quais  $u(x_i)$  é o valor absoluto do indicador normalizado,  $x_i$ ,  $x_j$  e  $x_k$  representam os valores absolutos do indicador.

Tabela 3 - Equações de nivelamento dos indicadores absolutos

Tipo	Equação	Indicadores
Utilidade Direta	$u(x_i) = \frac{x_i}{\sum_{i=1}^n x_i}$	Eficiência Fator de Capacidade Criação de Empregos

Tabela 3 - Equações de nivelamento dos indicadores absolutos (cont.)

Tipo	Equação	Indicadores
Utilidade Inversa	$u(x_i) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{j=1}^n x_j \left[ \sum_{k=1}^n \frac{x_k}{x_j} \right]}$	Dependência Externa Externalidades Sociais Externalidades Ambientais Custo Nivelado Ocupação do Solo

Dado que há indicadores de utilidade direta, ou seja, diretamente relacionados à sustentabilidade, nos quais valores maiores indicam uma maior sustentabilidade, e indicadores de utilidade inversa, nos quais valores maiores representam um desempenho menos sustentável, foram necessários dois métodos de cálculo distintos, apresentados na Tabela 3. Essa diferenciação considera a natureza oposta desses indicadores, adaptando-se às diferentes direções desejadas para a mensuração do desempenho em sustentabilidade.

Para os indicadores categóricos foram estabelecidas correlações entre o valor atribuído e um índice entre 0 e 1, tipicamente sendo utilizados os valores 0, 0,5 e 1, por terem sido utilizados sempre três valores para as variáveis categóricas. As Tabelas 4 e 5 mostram a correlação entre o atributo e o valor utilizado no cálculo.

Tabela 4 - Correlação de atributo-valor para o indicador Resposta à Demanda

Indicador	Atributo	Valor
Resposta à Demanda	Sim, rápida	1
	Sim, lenta	0,5
	Não	0

Tabela 5 - Correlação de atributo-valor para o indicador Aceitação Pública

Indicador	Atributo	Valor
Aceitação Pública	Alta	1
	Média	0,5
	Baixa	0

Além disso, foram atribuídos pesos para cada indicador. Esses pesos foram redimensionados com a intenção de aproximar a matriz de sustentabilidade ao nosso particular entendimento da realidade brasileira. A Figura 1 mostra os pesos escolhidos em cada dimensão e indicadores.

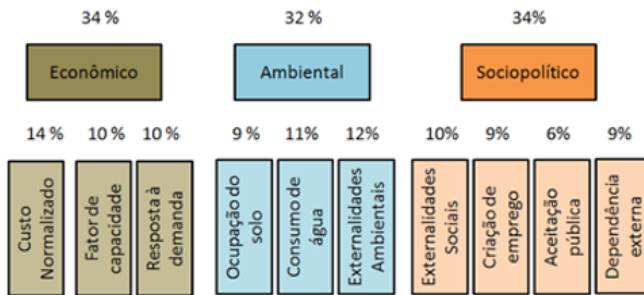


Figura 1 - Apresentação gráfica dos indicadores e os pesos atribuídos pelo grupo de autores

#### 4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Efetuando-se os cálculos de ponderação após utilizar as equações de nivelamento apresentadas na Tabela 3 e somando-se os indicadores finais para cada fonte, obtemos os resultados finais que são apresentados na Tabela 6 e na Figura 2.

Tabela 6 - Matriz dos Indicadores Normalizados e dos Resultados Encontrados

	Econômico / Tecnológico			Ambiental			Sócio-político				Totais
	Custo Normalizado	Resposta a Demanda	Fator de Capacidade	Ocupação do Solo	Consumo de Água	Externalidades Ambientais	Externalidades Sociais	Criação de Empregos	Aceitação Pública	Dependência Externa	
Fontes/ Pesos	0,14	0,1	0,1	0,09	0,11	0,12	0,1	0,09	0,06	0,09	
Gás Natural	0,165	1,000	0,360	0,771	0,023	0,019	0,140	0,106	0,500	0,000	0,287
Hidroelétrica de Grande Porte	0,488	1,000	0,229	0,058	0,647	0,181	0,167	0,529	0,500	1,000	0,474
Eólica (onshore)	0,169	0,000	0,114	0,152	0,305	0,720	0,067	0,1630	1,000	1,000	0,400
Biomassa	0,179	0,500	0,297	0,019	0,026	0,080	0,026	0,202	1,000	1,000	0,290
Eólica (offshore)	0,100	0,000	0,169	0,087	0,225	0,720	0,667	0,163	1,000	1,0000	0,381
Nuclear	0,239	0,500	0,360	1,991	0,010	0,475	0,195	0,135	0,000	0,816	0,462
Carvão	0,200	0,500	0,360	0,613	0,021	0,008	0,015	0,106	0,000	0,837	0,259
Solar	0,072	0,500	0,191	0,519	0,027	0,369	0,256	0,221	1,000	1,000	0,369



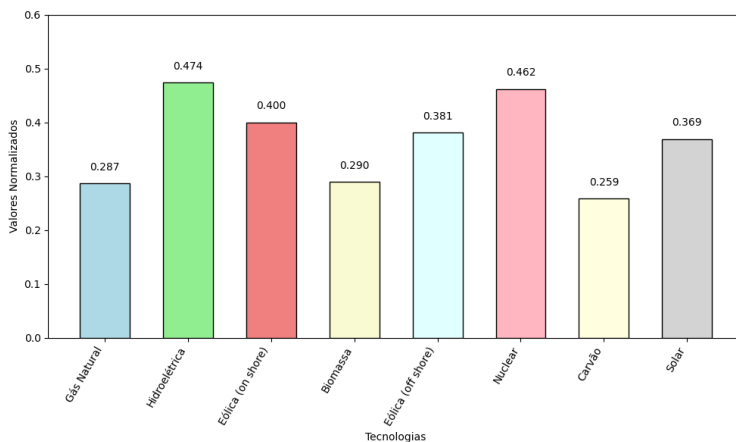


Figura 2 - Resultados finais da soma dos indicadores finais de cada fonte

## 5. CONCLUSÃO

Embora não exista um consenso e ainda possa haver divergências entre pesquisadores na seleção dos indicadores, pesos, tratamento dos dados e condições de contorno, o exercício deve ser executado para compreender as dificuldades e apontar a necessidade de elaboração de indicadores cada vez menos subjetivos e mais precisos para avaliação e comparação de tecnologias.

As principais contribuições deste trabalho residem na revisão dos indicadores junto uma variação na forma de normalização que mantém a proporcionalidade dos dados para cada indicador quantificável. Essas alterações equilibram as quantidades de indicadores por dimensão, permitindo uma avaliação mais equilibrada.

Quanto aos pesos individuais dos indicadores, buscou-se manter um equilíbrio entre as diferentes dimensões. No entanto, houve uma redistribuição das parcelas relativas dentro de cada dimensão para refletir a importância de cada indicador no contexto brasileiro. Entretanto, essa redistribuição não seguiu uma metodologia abrangente e equilibrada por agentes multidisciplinares, o que pode resultar em imperfeições decorrentes de visões potencialmente parciais dos autores deste estudo. Estudar métodos para se determinar estes pesos são interessantes para trabalhos futuros.

Em nossa avaliação, os destaques foram a energia hidrelétrica, que se manteve como a tecnologia de geração de eletricidade de maior sustentabilidade, nuclear, a segunda colocada e a eólica *onshore*, na terceira posição. Os destaques negativos vão para o carvão,

última colocada e a biomassa, que obteve um índice de sustentabilidade apenas 12% maior que a do carvão.

Concluimos que a utilização de indicadores de sustentabilidade, exemplificados neste estudo, não só facilita a comparação entre diferentes fontes de energia com base em dados científicos, mas também oferece um suporte valioso para planejadores e tomadores de decisão ao elegerem opções de geração de energia elétrica. Esse processo gera argumentos sólidos para a escolha, isolando ou minimizando pressões de grupos econômicos, políticos e sociais, culminando em decisões de maior relevância para o país como um todo. Assim, tanto o setor público em seu planejamento energético, quanto empresas privadas, podem adotar os resultados deste trabalho como referência, orientando a escolha de fontes energéticas alinhadas com critérios de sustentabilidade. A seleção de indicadores apropriados, como proposto neste estudo, surge como um recurso fundamental na construção de um modelo energético mais sustentável e resiliente para o Brasil, levando em consideração as necessidades específicas do país, os desafios do século XXI, e contribuindo para uma transição energética com a expectativa de ampliar a sustentabilidade do setor de energia elétrica brasileira.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFFAIRS, I. P. *The Reputation of Energy Sources: American Public Opinion in a Global Context*. [S.l.], 2010.

BREEZE, P. *Power generation technologies*. [S.l.]: Newnes, 2019.

CESARETI, M. A. *Análise comparativa entre fontes de geração elétrica segundo critérios socioambientais e econômicos*. Dissertação (Dissertação) — Universidade Federal do ABC, 2010. Disponível em: <[http://biblioteca.ufabc.edu.br/index.php?codigo\\\_sophia=6227](http://biblioteca.ufabc.edu.br/index.php?codigo\_sophia=6227)> Acesso em: 28 fev. 2024.

COMISSÃO EUROPEIA. *ExternE -- externalities of energy – Methodology 2005 update*. Editado por P. Bickel & R. Friedrich. Luxembourg: Publications Office, 2005.

COQ, C. L.; PALTSEVA, E. *Measuring the security of external energy supply in the european union*. *Energy Policy*, v. 37, n. 11, p. 4474–4481, 2009.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. *Balço Energético Nacional 2023: Relatório Síntese*. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>> Acesso em: 28 fev. 2024.

EUROBAROMETER. Special Eurobarometer Energy Technologies: Knowledge Perception. [S.l.], 2007. 111 p. (Eurobarometer, 262).

FTHENAKIS, V.; KIM, H. C. Land use and electricity generation: A life-cycle analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n. 6, p. 1465–1474, 2009. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032108001354>> Acesso em: 28 fev. 2024.

FTHENAKIS, V.; KIM, H. C. Life-cycle uses of water in u.s. electricity generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, p. 2039–2048, 02 2010.

GREENBERG, M. Energy sources, public policy, and public preferences: Analysis of us national and site-specific data. *Energy Policy*, v. 37, n. 8, p. 3242–3249, 2009. ISSN 0301-4215. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421509002730>> Acesso em: 28 fev. 2024.

IEA - International Energy Agency. *World Energy Outlook 2011*. Paris: International Energy Agency (IEA), 2011. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2011>> Acesso em: 28 fev. 2024..

MAXIM, A. Sustainability assessment of electricity generation technologies using weighted multi-criteria decision analysis. *Energy Policy*, v. 65, p. 284–297, 2014. ISSN 0301-4215. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030142151300983X>> Acesso em: 28 fev. 2024.

NAVIGANT CONSULTING. *Job Creation Opportunities in Hydropower*. Washington, D.C.: Navigant Consulting, 2009.

NEA - Nuclear Energy Agency; IEA - International Energy Agency; OCDE. *Projected Costs of Generating Electricity*. [S.l.]: Nuclear Energy Agency (NEA); International Energy Agency (IEA); OCDE, 2010.