

INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE APLICADOS A FONTES DE GERAÇÃO DE ENERGIA: HIDROELETRICIDADE, BIOMASSA, EÓLICA E GÁS NATURAL

**SUSTAINABILITY INDICATORS APPLIED TO ENERGY GENERATION
SOURCES: HYDROELECTRICITY, BIOMASS, WIND AND NATURAL GAS**

INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE APLICADOS A FONTES DE GERAÇÃO DE ENERGIA: HIDROELETRICIDADE, BIOMASSA, EÓLICA E GÁS NATURAL

SUSTAINABILITY INDICATORS APPLIED TO ENERGY GENERATION SOURCES: HYDROELECTRICITY, BIOMASS, WIND AND NATURAL GAS

Pedro Henrique Silva Rodrigues¹ • Roberto Asano Junior²
Ricardo Drudi³ • Douglas Bellini⁴

Data de recebimento: 11/04/2024

Data de aceite: 26/11/2024

¹ Graduação em Bacharelado em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal do ABC, graduação em Engenharia de Energia pela Universidade Federal do ABC, mestrado em Energia pela Universidade Federal do ABC e doutorado em Energia pela Universidade Federal do ABC. É professor adjunto da Universidade Federal do ABC.

E-mail: pedro.rodrigues@ufabc.edu.br

² Doutor em Energia pela Universidade Federal do ABC (UFABC), MBA pela Universitat de Barcelona (UB - Espanha) e Engenheiro Eletricista pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

E-mail: roberto.asano@ufabc.edu.br

³ Doutorado em Energia pela UFABC, mestrado em Energia pela UFABC, e graduação em Matemática com ênfase em Informática. Professor de Matemática e Computação em cursos de graduação.

E-mail: ricardo.drudi@ufabc.edu.br

⁴ Graduação em Engenharia Elétrica pelo Instituto Mauá de Tecnologia e mestrado em Energia pela Universidade Federal do ABC (UFABC).

E-mail: douglasbellini.engenharia@gmail.com

RESUMO

O estudo explora a complexidade na escolha de indicadores de sustentabilidade para fontes de energia, reconhecendo divergências entre pesquisadores e enfatizando a importância do exercício para impulsionar a criação de indicadores mais precisos. A aplicação dos indicadores propostos possibilita uma análise científica das fontes de energia, oferecendo subsídios valiosos para decisões no planejamento energético e minimizando influências externas. A revisão crítica dos indicadores de Maxim destaca desafios na comparação de eficiência devido à diversidade de recursos energéticos, salientando a necessidade do uso sustentável da água. As alterações na normalização e ponderação buscam equilibrar a avaliação, apesar de reconhecerem limitações na metodologia. Apesar de não impactarem significativamente a classificação final em relação ao trabalho de Maxim, as modificações indicam uma maior proximidade entre as tecnologias avaliadas em termos de sustentabilidade. A energia hidroelétrica destaca-se como a opção mais sustentável, enquanto a biomassa apresenta-se como uma alternativa comparável ao gás natural. Esses resultados ressaltam a importância de considerar critérios sustentáveis nas decisões energéticas, com implicações não apenas para o setor, mas também para contextos de decisões complexas e multidimensionais.

Palavras-chave: indicadores de sustentabilidade; Planejamento energético; decisão multicritério.

ABSTRACT

The study explores the complexity of choosing sustainability indicators for energy sources, acknowledging disagreements between researchers and emphasizing the importance of the exercise to drive the creation of more accurate indicators. The application of the proposed indicators enables a scientific analysis of energy sources, providing valuable input for energy planning decisions and minimizing external influences. The critical review of Maxim's indicators highlights challenges in comparing efficiency due to the diversity of energy resources, stressing the need for sustainable water use. The changes in normalization and weighting seek to balance the evaluation, despite acknowledging limitations in the methodology. Although they do not significantly impact the final ranking in relation to Maxim's work, the modifications indicate greater proximity between the technologies evaluated in terms of sustainability. Hydroelectric power stands out as the most sustainable option, while biomass is a comparable alternative to natural gas. These results highlight the importance of considering sustainable criteria in energy decisions, with implications not only for the sector, but also for complex and multidimensional decision-making contexts.

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

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, 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 reservatórios das principais hidrelétricas do país, a biomassa e o gás natural continuam a ser importantes fontes de energia 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).

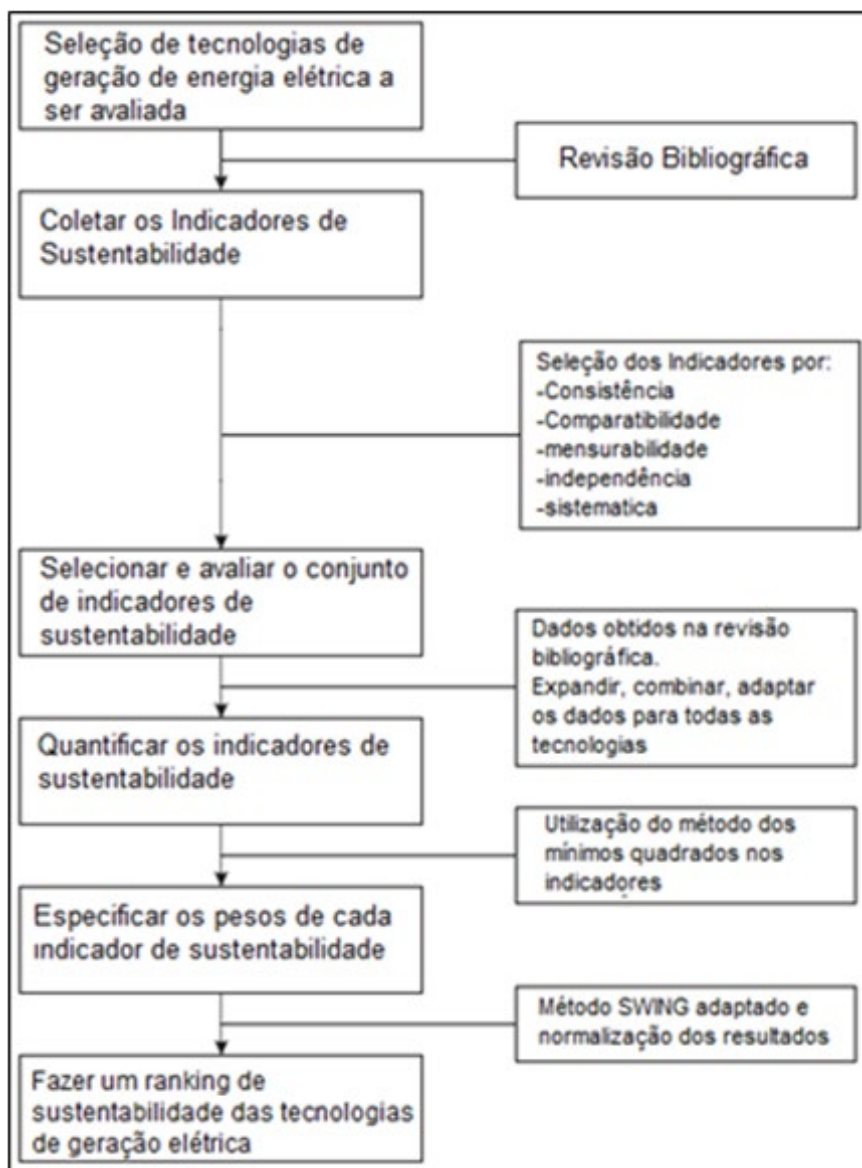
Diante da complexa tarefa de encontrar a matriz ideal, surge a necessidade de analisar criticamente as diversas alternativas disponíveis, considerando seus prós e contras. Uma grande quantidade de trabalhos de avaliação dos indicadores de sustentabilidade para fontes de geração de eletricidade com resultados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

Todavia essa discussão acadêmica tem pouca importância se os tomadores de decisão não fizerem uso destes mecanismos para produção das políticas energéticas. Pois, muitas vezes, as políticas energéticas são forjadas por outros aspectos da indústria, tal como o caso do incentivo ao uso do gás natural nos EUA, classificando-o de “energia limpa” para florescer o setor ou o incentivo chinês para energia de fontes renováveis que fortalece sua indústria de aerogeradores e painéis solares (Maxim, 2014).

Um dos trabalhos mais recentes e completos encontrado é o de Maxim (2014). Nele, o autor buscou selecionar um conjunto de indicadores que tivessem representatividade nas dimensões econômica, ambiental e social para avaliar as diferentes fontes de energia. A partir de uma extensa revisão bibliográfica, (Maxim, 2014) selecionou indicadores que fossem ao mesmo tempo consistentes, comparáveis para as tecnologias, mensuráveis, independentes e que abrangessem um determinado tema da maneira mais sistemática possível. Finalmente, após a coleta de dados, o autor faz uma pesquisa (*SWING survey*) com especialistas em energia para atribuição de pesos que são finalmente utilizados para balancear os indicadores e apresentar de uma classificação. A Figura 1 ilustra este processo.

Nesse trabalho partiremos do resultado de Maxim para abordar quatro fontes para geração de energia elétrica no Brasil: eólica, hídrica, biomassa e gás natural, tanto quanto possível pela disponibilidade dos dados, adaptando-as à realidade brasileira. Para isso, os indicadores, pesos e dados utilizados por Maxim foram revisados pelos autores, criticados e uma nova proposta foi sugerida para avaliação das quatro fontes selecionadas. Os resultados com os indicadores valores e pesos revisados foi apresentado e comparado com os originais.

Figura 1 | Metodologia empregada por Maxim



Fonte: (Maxim, 2014)

APRESENTAÇÃO DOS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE

O estudo utilizou quatro dimensões para distribuir os 10 indicadores de sustentabilidade: econômico, tecnológico, ambiental e sociopolítico. Nas próximas seções são apresentadas as fontes dos dados e metodologias utilizadas na avaliação das tecnologias selecionadas para cada indicador.

CUSTOS NIVELADOS DE ELETRICIDADE

Existem vários fatores de custos relacionados que precisam ser levados em consideração a fim de caracterizar com precisão as várias tecnologias de um ponto de vista econômico. Optou-se por utilizar um indicador de custos agregados chamado “Custos nivelados de Eletricidade (LCOE, na sigla original em inglês)”. O LCOE é utilizado por várias agências internacionais de energia e grandes empresas para comparar o custo médio de produção de energia elétrica para as várias tecnologias ao longo de todo seu ciclo de vida.

Os cálculos do LCOE 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 LCOE para cerca de 200 plantas de geração de eletricidade localizada em 21 países (NEA; IEA; OCDE, 2010).

Com estes dados estimou-se o LCOE usando a capacidade nominal da usina como parâmetro. Os resultados apresentados na Tabela 1 podem ser utilizados para comparar as várias tecnologias de geração sobre a dimensão econômica.

Tabela 1 | Custos nivelados de Eletricidade (\$/MWh) para as tecnologias estudadas.

Tecnologia	LCOE (\$/MWh)	Tecnologia	LCOE (\$/MWh)
Hídrica	26,35	Hídrica	46,66
Biomassa	72,00	Biomassa	97,10
Eólica (onshore)	76,28	Eólica (onshore)	109,61
Gás Natural	78,06	Gás Natural	85,30

Fonte: (Maxim, 2014)

CAPACIDADE DE ATENDER A DEMANDA

Este indicador, de característica técnica, refere-se a habilidade da tecnologia em responder rapidamente à demanda de energia elétrica (por exemplo, a variação da carga e flutuações de rede). As tecnologias que possuem esta capacidade podem ser usadas para balanceamento energético da rede elétrica. Tal capacidade torna-se cada vez mais importante conforme a quantidade de fontes energéticas intermitentes, como a energia solar fotovoltaica e a eólica, vêm aumentando. Este indicador pode ser utilizado para avaliar a geração de eletricidade de três maneiras:

- “sim, rápido” (tempo de resposta é medido em minutos);
- “sim, lento” (tempo de resposta é medido em horas);
- “não” (incapaz de gerar eletricidade sob demanda).

O estudo mostra que as grandes instalações hidroelétricas, bem como as de gás natural são capazes de fornecer uma resposta rápida para variações de demanda. Em contrapartida, algumas das mais populares tecnologias de energias renováveis não oferecem tal capacidade. Na Tabela 2 são mostradas a capacidade de resposta das fontes estudadas.

Tabela 2 | Capacidade de resposta à demanda

Tecnologia	Maneira
Hídrica	Sim, rápida
Biomassa	Sim, devagar
Eólica (onshore)	Não
Gás Natural	Sim, rápida

Fonte: (Breeze, 2019)

EFICIÊNCIA

O segundo indicador técnico foi calculado como a razão entre a saída de energia útil e a entrada total de energia e é expresso em porcentagem. Neste estudo, as fontes renováveis de energia que estão disponíveis diretamente receberam um índice de eficiência de 100%. Fontes de energia que necessitam uma conversão como, por exemplo, a combustão tem seu rendimento indicado, conforme critério utilizado pela IEA (2011), mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 | Índices de eficiência

Tecnologia	Valores (%)
Hídrica	100
Biomassa	35
Eólica (onshore)	100
Gás Natural	59

Fonte: (IEA, 2011)

FATOR DE CAPACIDADE

O fator de capacidade é calculado como a razão entre a real produção de energia elétrica de uma planta de geração durante certo período e a energia máxima teórica da planta se tivesse sido executado a plena capacidade durante todo o período. Este indicador mostra, em média, quanto da capacidade nominal de uma planta é na verdade, usada na prática. Os fatores de capacidade para a maioria das tecnologias de energia renováveis foram obtidos de IEA (2011) e NEA, IEA e OCDE (2010) e são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 | Fator de Capacidade

Tecnologia	Valores (%)
Hídrica	54
Biomassa	70
Eólica (onshore)	27
Gás Natural	85

Fonte: (IEA, 2011) e (NEA; IEA; OCDE, 2010)

USO DA TERRA

O uso da terra é um dos indicadores ambientais utilizados neste estudo. O uso da terra para a geração de energia cria um custo de oportunidade tanto para a habitação humana como para o uso da flora e fauna. A fim de produzir uma comparação justa de tecnologias, levamos em consideração o uso da terra ao longo de todo o ciclo de vida as usinas: a extração, processamento, transporte e eliminação de resíduos de combustíveis, além de considerar a construção, operação e desmantelamento da central de energia. Os resultados variam de uma fonte para outra conforme mostrado na Tabela 5 (Fthenakis, Kim, 2009).

Tabela 5 | Uso da Terra (m²/MWh)

Tecnologia	Valores (m ² /MWh)
Hídrica	4,1
Biomassa	12,65
Eólica (onshore)	1,57
Gás Natural	0,31

Fonte: (Fthenakis, Kim, 2009)

OS CUSTOS EXTERNOS AMBIENTAIS

Este indicador cobre uma ampla gama de poluentes e formas de impacto ambiental negativo, que vão desde a poluição sonora a emissões perigosas e avalia-os ao longo do ciclo de vida. Exemplos de fatores não levados em consideração por este estudo incluem o impacto visual dos parques eólicos, reduções de habitats naturais e o impacto do deslocamento forçado da população local para grandes projetos hidroelétricos, bem como as perdas de biodiversidade.

Tais efeitos ambientais seriam complicados de se avaliar de uma forma que permitisse uma justacomparação das diferentes tecnologias de geração de energia.

A Comissão Europeia (Comissão Europeia, 2005) 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. A pesquisa também criou instrumentos para facilitar cálculos de custos externos em vários prazos e posições geográficas (Comissão Europeia, 2005). Na Tabela 6 são mostrados os custos externos associados a cada uma das fontes estudadas.

Tabela 6 | Custos externos associados ao meio ambiente (€/ kWh)

Tecnologia	Ext _{min}	Ext _{max}
Hídrica	0,010	0,330
Biomassa	0,030	0,750
Eólica (onshore)	0,017	0,083
Gás Natural	0,800	3,200

Fonte: (Comissão Europeia, 2005)

OS CUSTOS EXTERNOS RELACIONADOS A SAÚDE HUMANA

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).

Tabela 7 | Custos externos associados à saúde humana (€/ kWh)

Tecnologia	Ext _{min}	Ext _{max}
Hídrica	0,020	0,670
Biomassa	0,170	4,250
Eólica (onshore)	0,034	0,168
Gás Natural	0,200	0,800

Fonte: (Maxim, 2014)

CRIAÇÃO DE EMPREGO

A criação de emprego está fortemente ligada à economia e ao desenvolvimento de uma comunidade ou país, ela é geralmente classificada como um fator social para o desenvolvimento sustentável. O indicador “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. A unidade de medição é chamada “anos de emprego” (um funcionário em tempo integral contratado a mais de 12 meses) por unidade de energia produzida.

Os valores foram calculados usando os dados fornecidos em um estudo realizado por (Navigant Consulting, 2009). Os valores do indicador só refletem contratações diretas sobre o ciclo de vida de toda a planta de geração de eletricidade. Contratações indiretas e contratações induzidas não foram incluídas. Na Tabela 8 esses valores são mostrados.

Tabela 8 | Criação de emprego (empregos-ano / GWh)

Tecnologia	Valores (empregos-ano / GWh)
Hídrica	0,55
Biomassa	0,21
Eólica (onshore)	0,17
Gás Natural	0,11

Fonte: (Navigant Consulting, 2009).

ACEITABILIDADE SOCIAL

A “aceitação social” e o “potencial de geração de conflitos” são usados como indicadores de sustentabilidade e estão relacionados 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 pessoas, 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.

Os três estudos foram considerados a fim de evitar quaisquer erros que possam surgir da cobertura geográfica ou a partir da metodologia. As respostas positivas em relação à aceitabilidade foram expressas em porcentagens da população total. A fim de comparar os resultados dos três estudos, os valores foram normalizados utilizando a mesma abordagem que o método de utilitário multi atributo e foram, em seguida, divididos em três intervalos de valores de igual tamanho:

- De 0% a 33%: “baixa”;
- De 34% a 67%: “médio”;
- De 68% a 100%: “alto”.

Na Tabela 9 são mostradas a relação de aceitabilidade às fontes energéticas estudadas.

Tabela 9 | Estudos usados para avaliar a aceitabilidade social das fontes de energia elétrica

Tecnologia	Euro-barometer	Greenberg	Ipsos	Autores
Hídrica	Alto	Alto	Alto	Alto
Biomassa	Médio	-	-	Médio
Eólica (onshore)	Alto	Alto	Alto	Alto
Gás Natural	Médio	Médio	Médio	Médio

Fonte: (Eurobarometer, 2007), (Greenberg, 2009) e (Affairs, 2010)

RISCO DE DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA EXTERNA

Um fator de motivação chave no desenvolvimento da energia é 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. Considerando que parte da energia provém da importação de combustíveis a partir regiões instáveis politicamente, existe um nível relevante de risco de fornecimento.

Mercados de choque, tais como os resultantes de disputas entre a Rússia e vários países devido ao gás natural, tem um efeito perturbador sobre o desenvolvimento econômico e da qualidade de vida nos países da Europa, por exemplo. É por isso que o risco de dependência energética externa é considerado ao avaliar a sustentabilidade das tecnologias de geração de eletricidade.

O estudo de (Coq; 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.

Tabela 10 | Risco de dependência energética externa

Tecnologia	Valores
Hídrica	0
Biomassa	0
Eólica (onshore)	0
Gás Natural	9,8

Fonte: (Coq; Paltseva, 2009)

MATRIZ DOS INDICADORES

A matriz completa dos indicadores utilizados por (Maxim, 2014) pode ser vista na Figura 2. Nessa matriz, alguns itens são categóricos, e outros têm valor absoluto. Para permitir uma classificação foi necessário adaptar esses valores a um padrão que permitisse uma comparação direta entre as diferentes tecnologias.

Figura 2 | Matriz de Indicadores das Tecnologias Analisadas pelo trabalho de (Maxim, 2014)

Tecnologias Avaliadas	Econômico	Tecnológico			Ambiental		Sociopolítico			
	Custo Normalizado	Resposta a Demanda	Eficiência	Fator de Capacidade	Ocupação do Solo	Externalidades Ambientais	Externalidades Sociais	Criação de Empregos	Aceitação Pública	Dependência Externa
Carvão	64,37	Lenta	0,48	0,85	0,39	7,35	7,65	0,11	Baixa	1,6
Gás Natural	78,06	Rápida	0,59	0,85	0,31	3,2	0,8	0,11	Média	9,8
Ciclo Combinado	62,81	Lenta	0,79	0,85	0,35	5,275	4,225	0,11	Baixa	5,7
Motor a Pistão	104,63	Rápida	0,5	0,85	0	6,5	4,95	0,11	Baixa	4,4
Hidroelétrica de Grande Porte	26,35	Rápida	1	0,54	4,1	0,33	0,67	0,55	Alta	0
Hidroelétrica de Pequeno Porte	124,97	Não	1	0,5	0,02	0,33	0,67	0,27	Alta	0
Eólica (on shore)	76,28	Não	1	0,27	1,57	0,083	0,168	0,17	Alta	0
Eólica (off shore)	128,68	Não	1	0,4	2,76	0,083	0,168	0,17	Alta	0
Geotérmica	39,98	Lenta	0,15	0,73	0,74	0,75	4,25	0,25	Média	0
Solar (fotovoltaica)	202,94	Não	1	0,2	0,33	0,162	0,438	0,87	Alta	0
Solar (termal)	177,8	Lenta	0,4	0,45	0,46	0,162	0,438	0,23	Alta	0
Biomassa	72	Lenta	0,35	0,7	12,65	0,75	4,25	0,21	Média	0
Nuclear	53,79	Lenta	0,33	0,85	0,12	0,126	0,574	0,14	Baixa	1,8

Fonte: (Maxim, 2014)

No contexto dos indicadores que apresentam valores absolutos realizou-se normalização desses valores entre 0 e 1, onde os extremos da série eram representados pelo maior e pelo menor valor. A abordagem permitiu equalizar os indicadores, que inicialmente possuíam valores absolutos distintos, conferindo-lhes o mesmo peso durante a comparação entre as tecnologias.

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 11. Essa diferenciação considera a natureza oposta desses indicadores, adaptando-se às diferentes direções desejadas para a mensuração do desempenho em sustentabilidade.

Tabela 11 | Equações de Normalização dos Indicadores Absolutos

Tipo	Equação	Indicadores
Utilidade Direta	$u(x_i) = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$	Eficiência Fatoe de Capacidade Criação de Empregos
Utilidade Inversa	$u(x_i) = \frac{x_{max} - x_i}{x_{max} - x_{min}}$	Dependência Externa Externalidades Sociais Externalidades Ambientais Custo Nivelado Ocupação do Solo

Fonte: autores

No qual $u(x_i)$ é o valor absoluto do indicador normalizado; x_i é o valor absoluto do indicador; as notações x_{min} e x_{max} referem-se aos valores mínimos e máximos absolutos, respectivamente, dos indicadores entre as tecnologias. 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 3 valores para as variáveis categóricas. As Tabelas 12 e 13 mostram a correlação entre o atributo e o valor utilizado no cálculo.

Tabela 12 | Correlação de Atributo-Valor para o Indicador Resposta a Demanda

Indicador	Atributo	Valor
Resposta a demanda	Sim, rápida	1
	Sim, lenta	0,5
	Não	0

Fonte: autores

Tabela 13 | Correlação de Atributo-Valor para o Indicador Aceitação Pública

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

Fonte: autores

Dessa forma, uma nova matriz de indicadores, já com os valores normalizados, foi elaborada e pode ser vista na Figura 3. Nessa matriz é possível a comparação direta dos valores entre indicadores. A pontuação final das tecnologias é obtida através da soma dos valores normalizados dos indicadores multiplicados pelos respectivos pesos. A última coluna da matriz da Figura 3 mostra os valores finais das tecnologias e possibilita a comparação direta entre elas.

Figura 3 | Matriz de Indicadores das Tecnologias Analisadas com Valores Normalizados

Tecnologias Avaliadas	Econômico	Tecnológico			Ambiental		Sócio-político				Totais
	Custo Normalizado	Resposta a Demanda	Eficiência	Fator de Capacidade	Ocupação do Solo	Externalidades Ambientais	Externalidades Sociais	Criação de empregos	Aceitação Pública	Dependência Externa	
Tecnologias / Pesos	0,114	0,112	0,114	0,097	0,088	0,109	0,11	0,082	0,076	0,099	
Carvão	0,785	0,500	0,388	1,000	0,969	0,000	0,000	0,000	0,000	0,837	0,455
Gás Natural	0,707	1,000	0,518	1,000	0,975	0,571	0,916	0,000	0,500	0,000	0,635
Ciclo Combinado	0,794	0,500	0,753	1,000	0,972	0,286	0,458	0,000	0,000	0,418	0,538
Motor a Pistão	0,557	1,000	0,412	1,000	1,000	0,117	0,361	0,000	0,000	0,551	0,514
Hidroelétrica de Grande Porte	1,000	1,000	1,000	0,523	0,676	0,966	0,933	0,579	1,000	1,000	0,881
Hidroelétrica de Pequeno Porte	0,442	0,000	1,000	0,462	0,998	0,966	0,933	0,211	1,000	1,000	0,697
Eólica (on shore)	0,717	0,000	1,000	0,108	0,876	1,000	1,000	0,079	1,000	1,000	0,684
Eólica (off shore)	0,421	0,000	1,000	0,308	0,782	1,000	1,000	0,079	1,000	1,000	0,661
Geotérmica	0,923	0,500	0,000	0,815	0,942	0,908	0,454	0,184	0,500	1,000	0,624
Solar (fotovoltaica)	0,000	0,000	1,000	0,000	0,974	0,989	0,964	1,000	1,000	1,000	0,671
Solar (termal)	0,142	0,500	0,294	0,385	0,964	0,980	0,964	0,158	1,000	1,000	0,630
Biomassa	0,741	0,500	0,235	0,769	0,000	0,908	0,454	0,132	0,500	1,000	0,539
Nuclear	0,845	0,500	0,212	1,000	0,991	0,994	0,946	0,039	0,000	0,816	0,657

Fonte: autores.

NOSSA VISÃO DOS INDICADORES

De forma geral, concordamos com os indicadores propostos pelo (Maxim, 2014), com a ressalva do indicador de eficiência. Embora conceitualmente eficiência tenha muita importância ao se avaliar uma tecnologia, isoladamente ela não é um bom parâmetro para comparar combustíveis e energias de origens distintas.

Uma eficiência de 50% pode ser considerada excelente para uma fonte energética e apenas razoável para outra. E como não foi encontrada uma forma de parametrizar adequadamente os diferentes níveis de eficiência das várias fontes energéticas, optou-se pela retirada deste indicador na composição da nossa matriz.

Por outro lado, (Maxim, 2014) não aborda em seu trabalho o consumo de água das tecnologias da geração de eletricidade. Assim como a ocupação do solo, a minimização do consumo também foi considerada crítica pelos autores conforme a valoração das relações de causa e efeito dos indicadores mostradas na Tabela 14. Neste caso, os valores de consumo apresentados por (Fthenakis, Kim, 2010) foram utilizados para avaliar as diversas tecnologias de geração de eletricidade sob a ótica deste indicador.

Tabela 14 | Tabela de Causa e Efeito de cada indicador

Indicador	Dimensão	Causa	Efeito
Custo Nivelado de eletricidade	Econômica	Os empreendimentos de menores custos ao longo do ciclo de vida são priorizados por este indicador.	Modicidade do custo da energia elétrica beneficia a competitividade do país e toda a sociedade.
Capacidade de responder a demanda	Tecnológica	Tecnologias com capacidade de responder às variações da demanda rapidamente são preferíveis por questões operacionais.	Parque gerador controlável com mínimas limitações para a operação, contribuindo para a segurança do fornecimento de energia elétrica.
Fator de Capacidade	Tecnológica	Tecnologias que têm maior fator de capacidade exigem menor capacidade instalada para uma mesma produção de energia.	Melhor aproveitamento dos recursos financeiros, naturais e energéticos.
Uso da Terra	Meio Ambiente	O uso e ocupação do solo para geração de energia elétrica concorrem com outros usos naturais do solo e devem ser minimizados.	Minimização do uso e degradação da terra para produção de energia, disponibilizando-o para outras finalidades.

Consumo de água	Meio Ambiente	A água é um recurso natural essencial para a vida e seu consumo deve ser minimizado para produção de energia.	Minimização do uso e degradação da água para produção de energia, disponibilizando-a para outras finalidades.
Custos externos (meio ambiente)	Meio Ambiente	Os custos externos associados aos impactos ambientais negativos devem ser minimizados.	A minimização dos custos externos favorece a preservação e diminui os custos com a recuperação do meio ambiente.
Custos externos (saúde da população)	Meio Ambiente	Os custos externos associados aos impactos à saúde e mortalidade humana devem ser minimizados.	Menores índices de mortalidade e morbidez humana têm consequências diretas na qualidade de vida.
Criação de Empregos	Sociopolítica	O setor energético demanda mão de obra com impacto positivo sobre a sociedade e economia, por isso este indicador valoriza as fontes de energia com maior capacidade de geração de emprego.	Maximizar o potencial de distribuição de renda e redução de desigualdades sociais como recursos provenientes da geração de energia.
Risco de fornecimento externo	Sociopolítica	O menor risco de fornecimento externo é valorizado por este indicador.	Fontes de energia sem dependência tecnológica ou de combustíveis externos são importantes para a soberania e segurança energética do país.

Fonte: autores.

REDIMENSIONAMENTO DOS PESOS

Como apresentado na Figura 4, diferentemente das quatro dimensões apresentadas por Maxim, econômica, tecnológica, ambiental e sociopolítica, buscou-se reagrupar em apenas 3 dimensões pelos seguintes motivos:

A distribuição tradicional da sustentabilidade em 3 dimensões, econômica, social e ambiental, atribui, de um modo geral, a cada uma dessas áreas uma contribuição de 1/3 no índice de sustentabilidade do fator analisado. A inclusão da dimensão “tecnológica” diminui de importância relativa das 3 dimensões tradicionais, e impacta no resultado da análise;

Os indicadores que foram considerados como de origem tecnológica podem ser considerados como pertinentes à dimensão econômica, pois eles impactam direta ou indiretamente no custo de geração ou operação da energia, e, por conseguinte, não necessariamente compõem uma dimensão distinta dessa;

A criação de uma nova dimensão de composição do índice de sustentabilidade impede a comparação do trabalho com outros na mesma área, pois pode dificultar, ou mesmo inviabilizar, uma análise entre os diversos estudos publicados no mesmo tema.

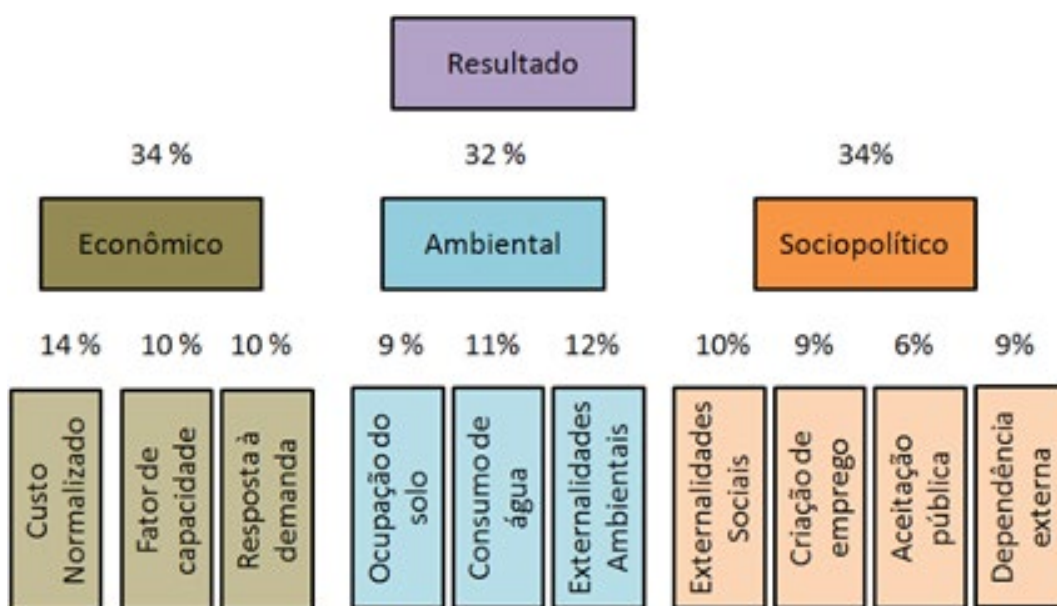
Dessa forma optou-se por reduzir o número de dimensões de 4 para 3, reclassificando os indicadores remanescentes da dimensão tecnológica para a dimensão econômica, possibilitando assim um equilíbrio maior entre essas áreas.

Neste trabalho os pesos de cada indicador foram redimensionados com a intenção de aproximar a matriz de sustentabilidade ao nosso particular entendimento da realidade brasileira. A Figura 4 mostra os pesos escolhidos em cada dimensão e indicadores.

NOSSA MATRIZ

Em seu trabalho, (Maxim, 2014) realizou a normalização dos valores dos indicadores, dimensionando-os em um intervalo real de 0 a 1. Ele atribuiu o valor 0 para a tecnologia com indicador menos benéfico sob o ponto de vista da sustentabilidade e 1 para a tecnologia com indicador mais benéfico. Embora matematicamente válido, esse critério não nos pareceu o mais adequado para essa análise. A normalização entre 0 e 1 dos indicadores desconsidera a proporção entre os valores absolutos apresentados.

Figura 4 | Apresentação gráfica dos indicadores e os pesos atribuídos pelo grupo de autores



Fonte: autores

Considere-se, como exemplo, o indicador “Criação de Empregos”. Para a tecnologia “Carvão” foi atribuído um valor absoluto de 0,11. Para a tecnologia “Solar – Fotovoltaica” foi atribuído um valor absoluto de 0,87. Depreende-se assim que a tecnologia “Solar – Fotovoltaica” gera cerca de 8 vezes mais empregos-ano por GWh que a tecnologia “Carvão”. Entretanto, com a normalização, “Carvão” ficou com valor 0, por ter o valor absoluto mais baixo, e “Solar – Fotovoltaica” com o valor 1, por ter o valor absoluto mais alto.

Os valores normalizados, 0 e 1, não refletem adequadamente o fato de que a tecnologia “Solar – Fotovoltaica” gere 8 vezes mais empregos do que a tecnologia “Carvão”, mas sim faz com que a tecnologia “Carvão” receba 0 pontos por “Criação de Empregos” na classificação das tecnologias, dando a entender que essa tecnologia não gera nenhum emprego, o que não é verdade, impactando fortemente no resultado da classificação.

Dessa forma um novo 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 15. Nos quais x_i , x_j e x_k representam os valores absolutos do indicador.

Tabela 15 | Equações de Nivelamento dos Indicadores Absolutos Adaptada

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

Fonte: autores.

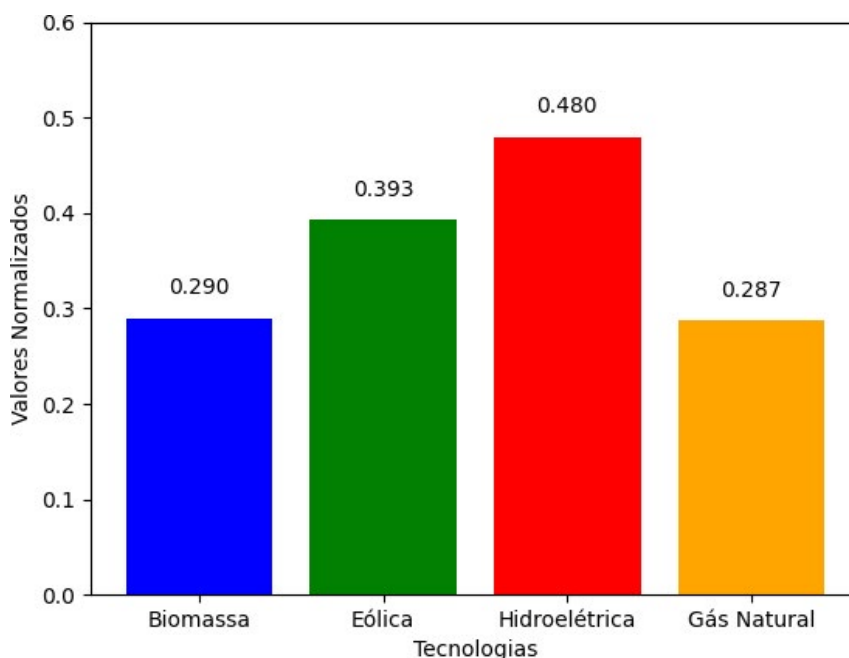
Com as mudanças propostas trabalho foi gerada uma nova matriz de sustentabilidade mostrada na Figura 5 e um novo ranking de sustentabilidade proposto com as novas metodologias de pesos é apresentado na Figura 6.

Figura 5 | Matriz de sustentabilidade proposta pelos autores

Respostas		Gás Natural	Hidroelétrica	Eólica	Biomassa
Econômico	Custo	78,06	26,35	76,28	72
Tecnológico	Resposta a Demanda	Rápida	Rápida	Não	Lenta
	Fator de Capacidade	0,85	0,54	0,27	0,7
Ambiental	Ocupação do Solo	0,31	4,1	1,57	12,65
	Consumo de Água	2300	80	230	2000
	Externalidades Ambientais	3,7	0,33	0,083	0,75
Sócio-político	Externalidades Sociais	0,8	0,67	0,168	4,25
	Criação de Empregos	0,11	0,55	0,17	0,21
	Aceitação Pública Dependência Externa	Média 9,8	Média 0	Alta 0	Alta 0
Totais		0,287	0,480	0,393	0,290

Fonte: autores.

Figura 6 | Ranking de sustentabilidade proposta pelos autores



Fonte: autores.

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.

O uso de indicadores de sustentabilidade, como os apresentados neste trabalho, permite uma comparação de diferentes fontes de energia baseada em dados científicos e serve para subsidiar planejadores e tomadores de decisão na eleição de opções de fonte para geração de energia elétrica. Tal processo fornece argumentos concretos para a seleção e isola (ou minimiza) o processo de pressões exercidas por grupos econômicos, políticos e sociais, culminando em decisões de maior relevância para o país em sua totalidade.

Assim, tanto o setor público, em seu planejamento energético, quanto empresas privadas podem utilizar os resultados desse trabalho como uma referência para determinar quais fontes energéticas melhor se alinham com os critérios de sustentabilidade. Independente do setor energético, esta metodologia também poderia ser aplicada para outras finalidades, onde decisões complexas e com envolvimento de diferentes dimensões e interesses precisam ser considerados.

As principais contribuições desse trabalho estão na revisão criteriosa dos indicadores apresentados por Maxim, onde foi constatado que o indicador eficiência é de difícil comparação pela diferente natureza dos recursos energéticos. Maxim não deu ênfase ao uso de água, também considerado como um recurso crítico neste trabalho, dada a atual necessidade de gerenciamento do uso múltiplo desse recurso no Brasil. Ambas as contribuições na alteração dos indicadores somou-se uma variação na forma de normalização que mantém a proporcionalidade dos dados para cada indicador quantificável.

Estas alterações balanceiam as quantidades de indicadores por dimensão permitindo mais equilíbrio na avaliação. Quanto aos pesos individuais dos indicadores, privilegiou-se a manutenção de um equilíbrio interdimensional, entretanto redistribuindo as parcelas relativas dentro de cada uma delas para traduzir a importância de cada indicador dentro do cenário brasileiro. Todavia, esta redistribuição não seguiu uma metodologia abrangente e balanceada por agentes multidisciplinares, deixando margem a imperfeições oriundas de visões potencialmente parciais dos autores deste trabalho.

Particularmente as alterações nos indicadores e nos pesos propostos pelo grupo não alteraram de maneira significativa a classificação final em relação ao trabalho de Maxim. Não obstante, os valores de sustentabilidade das tecnologias analisadas mostraram-se mais próximos entre si, e as fontes renováveis apresentaram-se como alternativas mais sustentáveis do que a fonte fóssil, como era de se esperar. Destaque para a energia hidroelétrica, que se manteve como a tecnologia de geração de eletricidade de maior sustentabilidade, e para a biomassa, que alcançou níveis comparáveis ao gás natural em nossa avaliação.

REFERÊNCIAS

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> 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. **Balanco 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.

