

AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA UTILIZANDO ANÁLISE RELACIONAL GREY

Pauli A. A. Garcia

PETROBRAS/CENPES/PDP/TEP

Avenida Hum, quadra 7, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ, CEP: 21941-598

pauliadriano@gmail.com

P. F. Frutuoso e Melo

COPPE/UFRJ - Nuclear

Caixa Postal 68509, Rio de Janeiro, RJ, CEP: 21941-972

frutuoso@con.ufrj.br

Júlio César Silva Neves

Instituto Militar de Engenharia – IME/RJ

Praça GAL Tibúrcio, 80, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, CEP 22290-270

sneves@de9.ime.eb.br

Resumo

A Análise Comparativa de Riscos é uma técnica onde se busca um equilíbrio entre benefício, custo e riscos associados às atividades desempenhadas com os mesmos propósitos. Tendo em vista a crescente demanda mundial por um suprimento sustentável de energia elétrica, neste trabalho apresenta-se um estudo onde são comparadas diferentes tecnologias de geração de energia. Os dados para o estudo foram levantados na literatura. Uma abordagem baseada em análise relacionada grey é apresentada como ferramenta de apoio à decisão. As tecnologias de geração de energia consideradas neste trabalho são: solar, biomassa, eólica, hidroelétrica, óleo, gás natural, carvão e nuclear. Os critérios considerados na análise são: **(a)** contribuição para a redução na expectativa de vida – em anos; **(b)** área utilizada – em km²; **(c)** toneladas de CO₂ liberados por GW gerado. Os resultados obtidos com o enfoque apresentado foram bastante satisfatórios demonstrando a potencialidade da abordagem apresentada.

Palavras-Chaves: Análise Relacional Grey; Análise Comparativa de Riscos; Tecnologia de Geração de Energia.

Abstract

The comparative risk analysis is a technique for seeking equilibrium among benefits, costs, and risks associated with common-purpose activities performed. In light of the ever-growing world demand for a sustainable power supply, in this paper is presented a comparison among different power generation technologies. The data for the comparative analyses has been taken from the literature. An approach based on grey relational analysis is proposed for performing the comparisons, and to support the decision making process. The generation technologies considered here are: solar, biomass, wind, hydroelectric, oil, natural gas, coal, and nuclear. The criteria considered in the analysis are: (a) contribution to the life expectancy reduction (in years); (b) used area (in km²); (c) tons of released CO₂ per GWh generated. The results obtained by using the aforementioned approach are promising and demonstrate his efficacy.

Keywords: Grey Relational Analysis; Comparative Risk Analysis; Energy Generation Technology.

1. INTRODUÇÃO

Uma análise comparativa de riscos (Comparative risk analysis - CRA) aplicada a sistemas de geração de energia deve ser baseada nos seguintes conceitos: (i) descrever, de forma quantitativa ou qualitativa, os fatores de impacto à saúde e ao meio ambiente, entre outros, provindos de diferentes fontes de riscos; (ii) usar um método que estabeleça uma comparação entre os impactos de modo a apoiar, de forma eficiente, o tomador de decisões [1].

De modo geral, risco é definido como a frequência de ocorrência de um determinado evento indesejado multiplicada pelos efeitos desta ocorrência. Em geral, principalmente quando se têm diferentes impactos associados, não é trivial convertê-los numa mesma unidade de medida. Este fato ocorre quando se deseja comparar diferentes tecnologias de geração de energia.

Note-se que o problema ao qual uma análise comparativa de risco se insere é multicritério, ou seja, diferentes critérios devem ser considerados na decisão a ser tomada. No caso em questão, os dados para a comparação entre as diferentes tecnologias provêm de um estudo realizado pela Universidade de Waterloo [2]. Nesse estudo, os impactos associados a: (a) redução na expectativa de vida (LLE); (b) área necessária (LAND) e; (c) toneladas de CO₂ liberadas por GW gerado foram quantificados para as tecnologias: (i) solar; (ii) biomassa; (iii) eólica; (iv) hidroelétrica; (v) óleo; (vi) gás natural; (vii) carvão e; (viii) nuclear.

No presente trabalho serão apresentados brevemente os conceitos relacionados à análise relacional grey (GRA) [3]. A GRA é parte de uma teoria maior, denominada teoria dos sistemas grey, desenvolvida na década de oitenta pelo professor Julong Deng. Como um método de medida, a GRA é proposta para se determinar o relacionamento entre uma observação referencial e observações comparativas [4].

2. ANÁLISE RELACIONAL GREY - GRA

A análise relacional grey (GRA) integra a teoria de sistemas grey [3]. É um método utilizado para determinar o grau de relacionamento entre uma observação referencial com observações levantadas, objetivando estabelecer um grau de proximidade com o estado meta, caracterizado pela observação referencial. Este grau de relacionamento grey (GRG) é calculado a partir de coeficientes relacionais grey (GRC).

Seja um conjunto de observações $\{x_0, x_1, \dots, x_n\}$, onde x_0 é uma observação referencial e x_1, x_2, \dots, x_n são observações a serem comparadas (neste trabalho serão as diferentes tecnologias de geração de energia). Cada observação x_i possui k atributos que são descritos sob a forma de séries $x_i = \{x_i(1), \dots, x_i(k)\}$, onde cada componente desta série, antes de qualquer operação, é normalizado. Diante disto, o coeficiente relacional grey é dado pela equação 1.

$$GRC(x_0(p), x_i(p)) = \frac{\min_{\forall j} \min_{\forall k} |x_0(k) - x_j(k)| + \zeta \max_{\forall j} \max_{\forall k} |x_0(k) - x_j(k)|}{x_0(k) - x_j(k) + \zeta \max_{\forall j} \max_{\forall k} |x_0(k) - x_j(k)|} \quad (1)$$

onde $\zeta \in [0,1]$ assume, em geral, o valor 0,5 sendo útil somente para diferenciar os elementos da série e não influenciando na ordenação final das séries, $i = j = 1, 2, \dots, m$ é o número de séries e, $k = p = 1, 2, \dots, n$ é o número de atributos por série [5].

Na equação 1, GRC, que assume valores entre zero e um, pode ser visto como a similaridade entre $x_0(p)$ e $x_i(p)$. Se $GRC(x_0(p), x_1(p))$ for maior do que $GRC(x_0(p), x_2(p))$ então a similaridade entre $x_0(p)$ e $x_1(p)$ é maior do que a similaridade entre $x_0(p)$ e $x_2(p)$.

Intuitivamente pode-se perceber que se o atributo p de x_i for igual ao atributo p de x_0

ter-se-á $GRC(x_0(p), x_i(p)) = 1$, ou seja, a similaridade entre os atributos será máxima. Por outro lado, quanto mais diferentes forem os atributos, mais próximo de zero será o coeficiente de relacionamento grey.

Por fim, o grau de relacionamento entre a série comparativa e a série padrão é dado por:

$$GRG(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n GRC(x_0(j), x_i(j)) \quad (2)$$

Note-se que GRG assumirá valores entre zero e um, onde quanto mais próximo de um, maior a similaridade entre a série x_0 e a série x_i . Uma interpretação similar à fornecida para o coeficiente relacional grey pode ser dada para o grau de relacionamento grey. Isto é, se $GRG(x_0, x_1)$ for maior do que $GRG(x_0, x_2)$, então a série x_1 tem maior similaridade com a série x_0 do que a série x_2 .

Com base no que foi apresentado, pode-se dizer que a análise relacional grey oferece as seguintes vantagens: (i) fornece uma função de medida normalizada, (ii) fornece uma medida de similaridade ou diferença entre observações e (iii) fornece uma ordem relacional completa de todo o espaço relacional.

2.1. NORMALIZAÇÃO DOS ATRIBUTOS

Conforme mencionado anteriormente, antes dos cálculos dos coeficientes relacionais e dos graus de relacionamentos, uma das seguintes normalizações devem ser realizadas com os atributos de todas as séries:

- ✓ Quanto maior melhor

$$x'_i(j) = \frac{x_0(j) - \min x_i(j)}{\max x_i(j) - \min x_i(j)} \quad (3)$$

onde $x_i(j)$ é o valor do atributo j da série i , $x'_i(j)$ é o valor normalizado do atributo j em relação ao mesmo atributo referente à série comparativa x_0 .

- ✓ Quanto menor melhor

$$x'_i(j) = \frac{\max x_i(j) - x_k(j)}{\max x_i(j) - \min x_i(j)} \quad (4)$$

- ✓ Quanto mais próximo de um valor melhor

$$x'_i = \frac{|x_i(j) - \varpi|}{\max x_i(j) - \min x_i(j)} \quad (5)$$

onde ϖ é um valor fixo pré-estabelecido.

Na próxima seção os conceitos referentes à GRA serão aplicados de modo a se estabelecer uma análise comparativa entre diferentes tecnologias de geração de energia.

3. ESTUDO DE CASO

Conforme já mencionado, os dados a serem utilizados neste trabalho estão contidos no estudo realizado pela Universidade de Waterloo [2] e podem ser vislumbrados na tabela 1.

Deve-se notar que nesta tabela encontra-se um atributo referente à contribuição para o aumento na expectativa de vida. Este atributo não foi considerado na aplicação da análise relacional pois tem o mesmo valor para todas as tecnologias consideradas, o que não influenciaria na priorização das mesmas.

Tabela 1: Dados associados às diferentes tecnologias de geração de energia

| Tecnologia | LLE ¹ (anos) | GLE ² (anos) | Área (Km ²) | CO ₂ (ton) |
|---------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Solar | 1 | 62 | 630 | 600 |
| Biomassa | 3,5 | 62 | 25600 | 600 |
| Eólica | 1 | 62 | 9900 | 600 |
| Hidroelétrica | 2,3 | 62 | 7600 | 2000 |
| Óleo | 4,5 | 62 | 20 | 700000 |
| Gás | 0,8 | 62 | 20 | 400000 |
| Carvão | 8,4 | 62 | 35 | 900000 |
| Nuclear | 0,8 | 62 | 10 | 2400 |

¹ Loss of Life Expectancy (redução na expectativa de vida)

² Gain in Life Expectancy (aumento na expectativa de vida)

Com os dados da tabela 1 os conceitos apresentados na seção anterior podem ser aplicados de modo a comparar as diferentes tecnologias. Para tanto o seguinte roteiro será seguindo [6]:

- I. Determinação dos atributos da tecnologia padrão;
- II. Normalização dos dados;
- III. Determinação de uma matriz de diferenças;
- IV. Cálculo dos coeficientes relacionais grey;
- V. Cálculo do grau de relacionamento grey de cada tecnologia com a tecnologia padrão.

I. Determinação dos atributos da tecnologia padrão

A tecnologia padrão é formada por atributos que representem um estado meta, ou seja, por exemplo deve-se estabelecer, para o caso da liberação de CO₂ a quantidade mínima para se gerar uma quantidade de energia desejada. No presente caso, esta quantidade é assumida como sendo a menor quantidade liberada dentre todas as tecnologias consideradas, ou seja, 600 ton. O mesmo raciocínio deve ser seguido para o estabelecimento dos demais atributos da série padrão.

Diante disto, a série padrão é:

$$x_0 = (\text{LLE} = 0,8, \text{Área} = 10, \text{CO}_2 = 600)$$

II. Normalização dos dados

A normalização dos dados deve ser feita de forma a respeitar às metas desejadas, ou seja:

- a) Quanto menor a contribuição para a redução na expectativa de vida melhor. Neste caso a equação 4 será utilizada para normalizar os atributos LLE de todas as séries.

- b) Quanto menor a área utilizada melhor. Conforme o atributo LLE, o atributo referente à área utilizada será normalizado utilizando-se a equação 4.
- c) Quanto menor a liberação de CO₂ melhor. Como os atributos anteriores, a equação 4 será utilizada para normalizar a quantidade liberada de CO₂ por tecnologia de geração de energia.
- d) O atributo referente ao aumento na expectativa de vida, caso fosse ser considerado, deveria ser normalizada de acordo com a equação 3, isto é, quanto maior a contribuição para o aumento na expectativa melhor. Como este atributo é o mesmo para todas as tecnologias ele não terá nenhuma influência para a comparação dos graus de relacionamento grey entre as diferentes tecnologias.

As normalizações mencionadas podem ser vistas na tabela 2

Tabela 2: Dados normalizados

| Tecnologia | LLE | Land | CO2 |
|---------------|-------------|----------|----------|
| Solar | 0,973684211 | 0,975772 | 1 |
| Biomassa | 0,644736842 | 0 | 1 |
| Eólica | 0,973684211 | 0,613521 | 1 |
| Hidroelétrica | 0,802631579 | 0,7034 | 0,998443 |
| Óleo | 0,513157895 | 0,999609 | 0,22237 |
| Gas | 1 | 0,999609 | 0,555926 |
| Carvão | 0 | 0,999023 | 0 |
| Nuclear | 1 | 1 | 0,997999 |
| Padrão | 1 | 1 | 1 |

III. Determinação da Matriz de diferenças

A matriz de diferenças fornece uma avaliação preliminar das diferenças entre os atributos das séries comparativas e os da série padrão, além de facilitar o cálculo dos coeficientes relacionais grey.

Tabela 3: Matriz de diferenças

| | | |
|----------|----------|----------|
| 0,026316 | 0,024228 | 0 |
| 0,355263 | 1 | 0 |
| 0,026316 | 0,386479 | 0 |
| 0,197368 | 0,2966 | 0,001557 |
| 0,486842 | 0,000391 | 0,77763 |
| 0 | 0,000391 | 0,444074 |
| 1 | 0,000977 | 1 |
| 0 | 0 | 0,002001 |

IV. Cálculo dos coeficientes relacionais grey

Os coeficientes relacionais foram calculados conforme a equação 1 apresentada na seção anterior, tabela 4.

Tabela 4: Coeficientes relacionais grey

| Tecnologia | LLE | Land | CO2 |
|---------------|----------|----------|----------|
| Solar | 0,95 | 0,953783 | 1 |
| Biomassa | 0,584615 | 0,333333 | 1 |
| Eólica | 0,95 | 0,564029 | 1 |
| Hidroelétrica | 0,716981 | 0,627667 | 0,996896 |
| Óleo | 0,506667 | 0,999219 | 0,39135 |
| Gás | 1 | 0,999219 | 0,52962 |
| Carvão | 0,333333 | 0,99805 | 0,333333 |
| Nuclear | 1 | 1 | 0,996013 |

A partir dos coeficientes relacionais pode-se calcular o grau de relacionamento grey para cada tecnologia de geração de energia com a tecnologia padrão, formada pela série padrão.

V. Cálculo do grau de relacionamento grey

Com o estabelecimento do grau de relacionamento grey, pode-se estabelecer uma ordem de prioridade entre as diferentes tecnologias de geração de energia, ou seja, pode-se determinar que tecnologias estão mais relacionadas com a tecnologia padrão.

Note-se, na tabela 5, que a tecnologia que apresenta maior grau de relacionamento é a nuclear seguida de perto pela solar. Ou seja, diante disto pode-se dizer que as tecnologias que mais se aproximam da tecnologia padrão, considerando-se os indicadores obtidos em literatura e apresentados neste artigo, são, nesta ordem, nuclear, solar, eólica, gás, hidroelétrica, óleo, biomassa e carvão.

Tabela 5: Grau de relacionamento grey das diferentes tecnologias sob análise

| Tecnologia | GRG |
|---------------|-------------|
| Solar | 0,987363999 |
| Biomassa | 0,661184211 |
| Eólica | 0,896801279 |
| Hidroelétrica | 0,876118688 |
| Óleo | 0,683784397 |
| Gás | 0,888883849 |
| Carvão | 0,499755764 |
| Nuclear | 0,999499666 |

4. CONCLUSÃO

Tendo em vista que o objetivo deste trabalho era o de propor uma abordagem que pudesse contribuir para que se estabelecesse uma análise comparativa entre as diferentes tecnologias de geração de energia, onde fatores com características totalmente distintas

deveriam ser considerados, pode-se dizer que, com os resultados obtidos, a análise relacional grey mostrou-se bastante promissora.

Novos estudos envolvendo esta abordagem devem ser realizados no intuito de explicitar vantagens e desvantagens relacionadas à utilização de análise relacional grey como ferramenta de suporte à decisão envolvendo um contexto multicritério.

Em estudos futuros envolvendo análise comparativa de risco entre tecnologias de geração de energia pretende-se buscar indicadores específicos brasileiros para que se possa realizar uma análise comparativa entre as diferentes tecnologias que vem sendo levantadas para suprir as crescentes demandas nacionais.

Deve-se ressaltar que a abordagem aqui apresentada não deve em hipótese alguma substituir a decisão de um especialista, pelo contrário, os resultados de uma análise como esta deve nortear as decisões. Deve ser observado que a abordagem não considera as possíveis estratégias envolvidas numa decisão onde fatores não-mensuráveis são considerados.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] MATSUKI, Y & LEE, R., Comparing Different Energy Risks: Methodology and Issues, *IAEA Bulletin*, No. 41, Jan. (1999).

[2] NATHWANI J.S., SIDDALL E., LIND N.C., *Energy for 300 years: Benefits and risks*, Institute for Risk Research, University of Waterloo ,Ontario, Canada (1992).

[3] DENG, J., Introduction to grey system theory. *Journal of Grey Systems*; V. 1, No 1, pp. 1-24 (1989).

[4] HUANG, C & LEE, H. (2004). A grey-based nearest neighbor approach for missing attribute value prediction. *Applied Intelligence*, No 20, pp. 239-252.

[5] CHANG, C, LIU, P e WEI, C (2001). Failure mode and effect analysis using grey theory. *Integrated Manufacturing Systems*, V. 12, No 3, pp. 211-216.

[6] CHEN, C & TING, S (2002). A study using the grey system theory to evaluate the importance of various service quality factors. *International Journal of Quality and Reliability Management*, V. 19, No 7, pp. 838-861.