

Estudo de um índice de ecoeficiência para projetos de emissões de poluentes utilizando método AHP na tomada de decisão

Study of an eco-efficiency index for pollutant emission projects using AHP method in decision making

Estudio de un índice de ecoeficiencia para proyectos de emisión de contaminantes utilizando el método AHP en la toma de decisiones

Recebido: 21/08/2022 | Revisado: 30/08/2022 | Aceito: 03/09/2022 | Publicado: 11/09/2022

Yago Fraga Ferreira Brandão

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9236-3842>
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil
E-mail: yagoffb9@gmail.com

Wagner Eustáquio de Vasconcelos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1609-8351>
Universidade Católica de Pernambuco, Brasil
E-mail: Wagnervas@gmail.com

Resumo

O índice de ecoeficiência deve ser mensurado a partir de parâmetros ambientais, energia e materiais, dentre outros, onde ajudará no combate ao desperdício e deverá contribuir para monitorar a implantação de um projeto sustentável. Neste trabalho foi desenvolvido um algoritmo baseado no método AHP com o objetivo de auxiliar as pessoas em tomadas de decisões em projetos que simulam situações reais de combustão; para isso foi utilizado o software MATLAB. As etapas empregadas foram: Definição dos critérios (emissões SO_x, NO_x, MP e COV), criação da matriz de julgamento e simulação dos valores atribuídos para os projetos (utilizando a resolução CONAMA 436/2011 como parâmetro). Os resultados demonstraram que o projeto 3 teve o melhor índice de ecoeficiência dado seu vetor de decisão ser o de menor impacto em comparação aos outros projetos; da mesma forma o projeto 2 mostrou-se o mais prejudicial nas condições avaliadas. Espera-se que a partir desse trabalho novas soluções mais complexas possam ser criadas utilizando novos critérios, cenários e outros métodos e lógicas de programação.

Palavras-chave: Ambiente; Industrial; Matriz de julgamento; Matlab.

Abstract

The eco-efficiency index must be measured based on environmental, energy and material parameters, among others, where it will help in the fight against waste and should contribute to monitoring the implementation of a sustainable project. In this work, an algorithm based on the AHP method was developed aiming to help people in decision-making in projects that simulate real combustion situations; the MATLAB software was used for this. The steps used were: Definition of criteria (SO_x, NO_x, PM, and VOC emissions), creation of the judgment matrix, and simulation of the values assigned to the projects (using CONAMA resolution 436/2011 as a parameter). The results showed that project 3 had the best eco-efficiency index since its decision vector has the lowest impact compared to other projects; likewise, project 2 proved to be the most harmful under the conditions evaluated. It is expected that from this work new more complex solutions can be created using new criteria, scenarios, and other methods and programming logic.

Keywords: Environmental; Industrial; Judgment matrix; Matlab.

Resumen

El índice de ecoeficiencia debe medirse en base a parámetros ambientales, energéticos y materiales, entre otros, donde ayudará en la lucha contra los residuos y deberá contribuir al seguimiento de la ejecución de un proyecto sostenible. En este trabajo se desarrolló un algoritmo basado en el método AHP con el objetivo de ayudar a las personas en la toma de decisiones en proyectos que simulan situaciones reales de combustión; Para ello se utilizó el software MATLAB. Los pasos utilizados fueron: Definición de criterios (emisiones de SO_x, NO_x, PM y VOC), creación de la matriz de juicio y simulación de los valores asignados a los proyectos (usando como parámetro la resolución CONAMA 436/2011). Los resultados mostraron que el proyecto 3 tuvo el mejor índice de ecoeficiencia ya que su vector de decisión es el de menor impacto en comparación con otros proyectos; del mismo modo, el proyecto 2 resultó ser el más dañino en las condiciones evaluadas. Se espera que a partir de este trabajo se puedan crear nuevas soluciones más complejas utilizando nuevos criterios, escenarios y otros métodos y lógicas de programación.

Palabras clave: Ambiente; Industrial; Matriz de sentencia; Matlab.

1. Introdução

A indústria moderna se caracterizou nos últimos anos pela busca da realização de melhores práticas de gestão e produção, em aperfeiçoamento do modelo de negócios da sua base de atividades, em acompanhar o que se faz no mercado, possuir um corpo técnico para resolver de problemas e aproveitar oportunidades de forma inovadora, além de estabelecer sistemas de melhoria contínua (Medeiros, et al., 2014). O que gera bens de propriedade para empresa como imóveis, máquinas, estoques, dentre outros, considerados ativos tangíveis (capital físico e financeiro) para empresa (Ferla, et al., 2019). Por outro lado, existem os intangíveis, que diferentemente do passado, pode agregar mais valor de mercado em muitas empresas (Buonomo et al., 2020).

O desenvolvimento da ecoeficiência dentro das empresas acaba contribuindo para o ativo intangível no que concerne na consciência ambiental e imagem de sustentabilidade da empresa. Mas aumentar a rentabilidade em paralelo com a redução dos impactos ambientais torna-se um desafio diário que permanecerá no mercado por muitos anos (Lim et al., 2022). Pois exige que os recursos investidos sejam bem distribuídos a se ter um equilíbrio possa se ter uma sustentabilidade financeira e ambiental em plena simbiose. Para isso se faz necessário desenvolver formas de quantificar o ativo tangível e intangível, e com isso, contribuir em estratégias de ação e planejamento da empresa (Calabrese et al., 2019).

Um dos fatores fundamentais nos ativos intangíveis de uma empresa é a sua reputação que agregada à imagem geram identidades fortes, principalmente em um mundo tão globalizado em uma busca constante pela sustentabilidade. A sustentabilidade pode ser trabalhada por meio dos benefícios da ecoeficiência (Liang et al., 2019). São diversos os benefícios da ecoeficiência como a minimização dos danos ambientais, reduzindo os riscos e responsabilidades derivadas; promoção de condições ótimas de segurança e saúde ocupacional; melhoria da eficiência e competitividade, favorecendo a inovação; melhoria da imagem e do relacionamento com os órgãos ambientais e com a comunidade entre outras (Bian et al., 2020).

Dentre as principais discussões sustentáveis no mundo, hoje a que mais se destaca são as emissões de poluentes; Em particular, tal "alerta ambiental" começou a tomar impulso crescente nas últimas décadas, quando a quantidade de as emissões de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera aumentaram a níveis alarmantes (Caravaggio et al., 2019).

De acordo com o CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), a poluição atmosférica pode ser definida como qualquer forma de matéria, ou energia, que apresente características que possam tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, ou ainda inconveniente ao bem-estar público, à saúde da fauna, flora ou à vida em comunidade (Brasil, 2018).

Os diferentes equipamentos e condições usados nos processos de queima acarretam na formação de produtos de combustão incompleta (PCIs), tais como: monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), óxidos de nitrogênio, NO_x (NO + NO₂), óxidos de enxofre, SO_x (SO₂, SO₄²⁻), compostos orgânicos voláteis (COVs) e partículas variadas (fuligem), partículas grossas, finas e ultrafinas (Gioda, 2018). Compostos orgânicos voláteis (COVs) são prejudiciais para o ser humano e o ecossistema circundante (Zou et al., 2019); juntamente com os COVs se destacam os materiais particulados que são o poluente atmosférico com mais impacto na saúde humana (De Araujo & Do Rosário, 2020).

A avaliação da concentração de gases reativos em ambientes abertos e fechados tem sido um problema analítico frequente no mundo moderno. Gases como o ozônio, dióxido de enxofre e dióxido de nitrogênio podem afetar a saúde humana, danificar a vegetação natural e degradar objetos que apresentam relevância cultural ou comercial (Souza, et al., 2017). A Resolução CONAMA Nº 436/2011 (estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02-01-2007) aponta como necessidade de controle os gases NOX, SOX e O₂ (Brasil, 2011).

Existem várias técnicas utilizadas no processo de tomada de decisão principalmente para auxiliar na escolha de projetos e contribuir na priorização de investimentos, onde podemos citar: teoria da utilidade, método Todim, Electre, Promethee e Processo Analítico Hierárquico (AHP) (Liao et al., 2020). Imprecisões podem contribuir na realidade dos

negócios devido a demanda crescente por processos que visam a sustentabilidade ambiental (Sun et al., 2019).

O Matlab é um ambiente computacional multiparadigmático que permite a manipulação de matrizes, plotagem de funções e dados, implementação de algoritmos e a criação de interfaces de usuário que podem ser interconectadas com programas escritos em outras linguagens (Jalalvand et al., 2019). O Matlab possibilita de problemas mais complexos que utilizam a lógica fuzzy como inteligências artificiais e redes neurais (Çevik & Tabaru-Örnek 2020).

O objetivo deste trabalho é aplicar o método AHP para determinação das concentrações de emissões de gases poluentes em uma fonte estacionária que simula as condições reais de combustão em uma indústria e com os resultados obtidos realizar a tomada de decisão priorizando o projeto com maior ecoeficiência.

2. Metodologia

A metodologia AHP foi aplicada neste trabalho tendo como base o algoritmo desenvolvido em Brandão, et al., (2022). Foram utilizados para tomada de decisão três projetos hipotéticos utilizando como critérios os poluentes: SO_x, NO_x, MP e COV.

Utilizando como base a resolução CONAMA nº 436/2011, os projetos hipotéticos foram criados com cada projeto ultrapassando o limite de um dos gases presentes na resolução; dessa forma o projeto 1 excedeu o limite de SO_x, o projeto 2 excedeu o limite de MP e o projeto 3 excedeu o limite de NO_x. Os valores dos limites estabelecidos pela resolução podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1- Valores dos limites estabelecidos pela resolução CONAMA nº 436/2011.

Poluente	SO _x	MP	NO _x ,
Valores em Nm ³ /mg	600	60	350

Fonte: Adaptado de Brasil (2011).

Observa-se na Tabela 1 que o poluente COV não tem um limite estabelecido para a resolução CONAMA nº 436/2011. A partir disso os valores dos poluentes (SO_x, NO_x e MP) para cada projeto foram colocados de forma que além de um dos poluentes exceder os limites, os outros dois (que estão na resolução) estivessem dentro dos parâmetros e para o COV foi utilizado valores proporcionais aos normalmente vistos em combustão a base seca (Brandão & dos Santos, 2020) que é a condição estabelecida pela resolução. Os valores adotados para cada projeto podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2- Valores adotados para os projetos.

Critérios	Projeto 1	Projeto 2	Projeto 3
SO _x	690	550	350
MP	45	73	56
NO _x	330	290	440
COV	1300	1800	1600

Fonte: Autores (2022).

Observa-se na Tabela 2 que o projeto 1 teve o valor de SO_x acima do limite, o projeto 2 teve o valor de MP acima do limite e o projeto 3 teve o valor de NO_x acima do limite. Para a aplicação AHP é necessário utilizar a escala de Saaty (2008) que atribui valores de julgamento para os critérios entre si. A escala se encontra na Tabela 3.

Tabela 3- Escala de Saaty.

Escala Numérica	Escala Verbal	Explicação
1	Ambos os elementos são de igual importância.	Ambos os elementos contribuem com a propriedade de igual forma.
3	Moderada importância de um elemento sobre o outro.	A experiência e a opinião favorecem um elemento sobre o outro.
5	Forte importância de um elemento sobre o outro.	Um elemento é fortemente favorecido.
7	Importância muito forte de um elemento sobre o outro.	Um elemento é muito fortemente favorecido sobre o outro.
9	Extrema importância de um elemento sobre o outro.	Um elemento é favorecido pelo menos com uma ordem de magnitude de diferença
2,4,6,8	Valores intermediários entre as opiniões adjacentes.	Usados como valores de consenso entre as opiniões

Fonte: Adaptado de Saaty (2008).

A Tabela 3 demonstra como a escala de Saaty interpreta os valores numéricos adotados como igual importância (valor 1) e forte importância (valor 5). Com o auxílio da Tabela 3 foi elaborada a matriz de julgamento, que julga os critérios entre si estabelecendo o grau de importância de cada critério analisado. A matriz de julgamento pode ser vista na Tabela 4.

Tabela 4- Matriz de Julgamento dos critérios.

Poluentes	SO_x	MP	NO_x	COV
SO_x	1	2	3	5
MP	1/2	1	3	4
NO_x	1/3	1/3	1	2
COV	1/5	1/4	1/2	1

Fonte: Autores (2022).

Como pode ser observado na Tabela 4 o poluente SO_x foi considerado o mais importante entre os critérios devido aos danos causados por ele durante as emissões de combustão (Vergnhanini Filho, 2020), seguido do MP e do NO_x , este julgamento dos critérios foi baseado nos danos que cada um causa ao ambiente. Como o COV não está presente na resolução ele foi utilizado como critério de menor importância.

Para atestar se os valores atribuídos nos critérios estão coerentes, é calculada a razão coerência que estabelece um valor de 10% para evitar grandes distorções entre os valores adotados o que tornaria o processo aleatório dificultando assim a tomada de decisão (Costa, 2020). No algoritmo validado por Brandão, et al., (2022) o índice é calculado durante a simulação de forma que ultrapassando o limite a simulação é interrompida e o processo deve ser refeito. Baseado nisso o algoritmo utilizado para este trabalho (também utilizando o Matlab) segue a mesma lógica de programação.

Após a simulação o algoritmo apontará o vetor de decisão com menor valor por entender que este é o menos danoso ao ambiente, portanto o que apresenta maior ecoeficiência.

3. Resultados e Discussão

A Tabela 5 apresenta os vetores de decisão obtidos após a simulação dos valores adotados para cada projeto.

Tabela 5 – Vetores de decisão.

Projeto	Vetor Decisão
1	0,3299
2	0,3463
3	0,3238

Fonte: Autores (2022).

A partir dos valores da Tabela 5 observa-se que o projeto 3 é o menos danoso ao ambiente, visto que seu índice é o mais baixo. Destaca-se apesar do poluente SO_x ter sido considerado o mais importante para a matriz de julgamento, ele não foi o mais danoso no cenário onde excedeu o limite do CONAMA; isto demonstra que o algoritmo não é previsível e pode fazer uma tomada de decisão acertada para o cenário proposto.

Ainda é possível destacar que os projetos 1 e 3 tiveram vetores de decisão com valores semelhantes, o que permite que a empresa julgue o que ela considera mais prejudicial (a partir da proximidade dos resultados entre os poluentes) levando em consideração que o algoritmo responde a uma situação hipotética que apenas demonstra qual dos projetos tem uma maior ecoeficiência, cabendo aos responsáveis tomar a decisão.

A razão de coerência encontrada foi de 2,44%, ou seja, dentro do limite considerado aceitável para o método AHP.

4. Conclusão

Com base nos resultados obtidos, o algoritmo mostrou-se capaz de tomar a decisão de uma forma coerente visto que sua razão de coerência se encontra dentro do aceitável para o método AHP. O algoritmo foi capaz de indicar o projeto com maior índice de ecoeficiência para o cenário apresentado.

A partir do algoritmo é possível utilizar outros métodos que permitam uma maior quantidade de critérios e até utilização de outros parâmetros mais complexos como a população ao redor da empresa, os danos causados aos trabalhadores que atuam na empresa; para isso se torna necessário o uso de ferramentas como a lógica fuzzy para resoluções de problemas complexos.

Sugere-se para trabalho futuros que novos cenários possam ser utilizados, além de explorar outras resoluções do CONAMA que contribuam para um ambiental mais saudável (do ponto de vista das emissões) e assim apresentar as empresas que causarão dano ao ambiente com suas operações, escolher a opção mais ecoeficiente. Além disso outros tipos de métodos de tomada de decisão podem ser utilizados como Fuzzy AHP e Todim-FSE.

Referências

Bian, Y., Dong, L., Liu, Z., & Zhang, L. (2020). A sectoral eco-efficiency analysis on urban-industrial symbiosis. *Sustainability*, 12(9), 3650.

Brandão, Y. F. F., de Vasconcelos, W. E., & Sales, I. T. (2022). Estudo De Caso Da Matriz Elétrica Brasileira: Escolha De Fontes Não Emissoras De Co₂ Com Auxílio Do Método Ahp: Case Study Of Brazilian Electric Matrix: Choice Of Sources Not Emitters Co₂ Assisted By Ahp Method. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 01-11.

- Brandão, Y. F. F., & Dos Santos, V. A. (2020). Desenvolvimento de um algoritmo para integrar um sistema de gestão de combustão em usinas termelétricas a carvão. *Avaliação, Diagnóstico e Solução de Problemas Ambientais e Sanitários* p. 27-35. <https://www.atenaeditora.com.br/post-artigo/38829>
- Brasil (2011). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução Nº 436, de 22 de Dezembro De 2011.
- Brasil (2018). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução Nº 491, de 19 de Novembro De 2018.
- Buonomo, I., Benevene, P., Barbieri, B., & Cortini, M. (2020). Intangible assets and performance in nonprofit organizations: a systematic literature review. *Frontiers in Psychology*, 11, 729.
- Calabrese, A., Costa, R., Levaldi, N., & Menichini, T. (2019). Integrating sustainability into strategic decision-making: A fuzzy AHP method for the selection of relevant sustainability issues. *Technological Forecasting and Social Change*. V. 139, p.155-168.
- Caravaggio, N., Caravella, S., Ishizaka, A., & Resce, G. (2019). Beyond CO₂: A multi-criteria analysis of air pollution in Europe, *Journal of Cleaner Production*.
- Çevik, M., & Tabaru-Örnek, G. (2020). Comparison of MATLAB and SPSS Software in the Prediction of Academic Achievement with Artificial Neural Networks: Modeling for Elementary School Students. *International Online Journal of Education and Teaching*, 7(4), 1689-1707.
- De Araujo, J. M., & Do Rosário, N. M. É. (2020). Poluição atmosférica associada ao material particulado no estado de São Paulo: análise baseada em dados de satélite. *Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online)*, 55(1), 32-47.
- Ferla, R., Muller, S. H., & Klann, R. C. (2019). Influência dos ativos intangíveis no desempenho econômico de empresas latino-americanas. *Brazilian Review of Finance*, 17(1), 35-50.
- Gioda, A. (2018). Comparação dos níveis de poluentes emitidos pelos diferentes combustíveis utilizados para cocção e sua influência no aquecimento global. *Química Nova*, 41, 839-848.
- Jalalvand, A. R., Roushani, M., Goicoechea, H. C., Rutledge, D. N., & Gu, H. W. (2019). MATLAB in electrochemistry: A review. *Talanta*, 194, 205-225.
- Liang, H., Ren, J., Lin, R., & Liu, Y. (2019). Alternative-fuel based vehicles for sustainable transportation: A fuzzy group decision supporting framework for sustainability prioritization. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 140, p.33-016.
- Liao, H., Wu, X., Mi, X., & Herrera, F. (2020). An integrated method for cognitive complex multiple experts multiple criteria decision making based on ELECTRE III with weighted Borda rule. *Omega*, 93, 102052.
- Lim, W. M., Ciasullo, M. V., Douglas, A., & Kumar, S. (2022). Environmental social governance (ESG) and total quality management (TQM): a multi-study meta-systematic review. *Total Quality Management & Business Excellence*, 1-23.
- Medeiros, J. F., Ribeiro J. L. D., & Cortimiglia, M. N. (2014). Success factors for environmentally sustainable product innovation: a systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*. V. 65, p.76-86.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, v. 1, n. 1, p. 83-98.
- Souza, P. A., Francisco, K. C., & Cardoso, A. A. (2017). Desenvolvimento de amostrador passivo sensível para monitoramento de poluição atmosférica por dióxido de nitrogênio. *Química Nova*, 40, 1233-1237.
- Sun, B., Tang, J., Yu, D., Song, Z., & Wang, P. (2019). Ecosystem health assessment: A PSR analysis combining AHP and FCE methods for Jiaozhou Bay, China. *Ocean & Coastal Management*, V. 168, p.41-50.
- Vergnhanini Filho, R. (2020). Emissão De Óxidos De Enxofre (Sox) Na Combustão Industrial. *Revista IPT: Tecnologia e Inovação*, 4(14).
- Zou, W., Gao, B., Ok, Y. S., & Dong, L. (2019). Integrated adsorption and photocatalytic degradation of volatile organic compounds (VOCs) using carbon-based nanocomposites: A critical review. *Chemosphere*, 218, 845-859.