

MÉTODO PARA SELEÇÃO DO USO DE BIOGÁS COM ABORDAGEM MULTICRITÉRIO

INTRODUÇÃO

As atividades agroindustriais e agrícolas são responsáveis pela geração de grandes quantidades de biomassa a partir da pecuária. A biomassa gerada em larga escala e não tratada causa sérios problemas ambientais como água, ar e polimento do solo. Os resíduos animais são ricos em matéria orgânica e podem ser reaproveitados e convertidos em energia por processos biotecnológicos. A tecnologia mais eficiente neste tratamento de biomassa agroindustrial é o processo de digestão anaeróbica para produção de biogás (KASIRI, S. MAH, F. ZHANG, C. HAVEROEN, M. ELLSWORTH, S. ULRICH 2012; MEJDOUB AND KSIBI 2014; B. ABADA 2007).

Nesse processo, a biomassa sofre decomposição por microrganismos em um sistema isento de oxigênio que transforma esse resíduo em dois produtos, o biofertilizante e o biogás. O tratamento por digestão anaeróbia pode ser aplicado aos mais variados tipos de resíduos, desde biomassa vegetal até dejetos animais que permite a produção de biogás rico em metano e dióxido de carbono, produtos muito úteis para fins energéticos (MEJDOUB AND KSIBI 2014), (CHENG ET AL. 2015; H. L. CHEN ET AL. 2013).

Para o tratamento da biomassa, o processo de digestão anaeróbia é a opção mais indicada, pois, ao mesmo tempo em que produz biogás, retira a carga orgânica poluente da biomassa, deixando-a inerte. A utilização desse processo para decompor a biomassa animal pode atender total ou parcialmente as demandas energéticas da indústria e da pecuária e, ao mesmo tempo, produzir valiosos fertilizantes orgânicos que podem reduzir significativamente os custos operacionais do sistema biodigestor (NEVZOROVA AND KUTCHEROV 2019).

O biogás é um combustível que pode ser produzido a partir de diversas fontes de matéria orgânica, culturas, resíduos de cultivos, esterco animal, resíduos orgânicos urbanos, águas residuais, alimentos e indústria florestal. Devido ao seu alto poder calorífico, o biogás é uma importante fonte de energia renovável e pode ser aplicado para diversos fins, como aquecimento, cogeração ou geração de eletricidade. Além disso, atualmente pode ser considerada a única tecnologia capaz de reduzir as emissões de dióxido de carbono dos sistemas de geração de energia em larga escala (HAGMAN AND EKLUND 2016).

O biogás também pode substituir o gás natural nas mesmas aplicações, incluindo aquecimento, geração de eletricidade e, uma vez purificado, biocombustível para veículos. Além de apresentar características semelhantes ao gás natural, o biogás tem menor impacto ao meio ambiente e sido amplamente utilizado como combustível veicular tornando comum o uso em ônibus de transporte público nas cidades (NEVZOROVA AND KUTCHEROV 2019, KHAN ET AL. 2014).

Sendo assim, os processos de produção de biogás devem ser bem dimensionados para que o produto final não se torne mais caro que os combustíveis fósseis convencionais, portanto, o preço do biogás deve ser competitivo com outros combustíveis disponíveis no mercado (MARTIN, 2015, HOPPE AND SANDERS 2014).

Devido às vastas possibilidades de utilização do biogás e aos desafios técnicos da viabilidade de implantação do sistema para sua produção, é fundamental ter parâmetros confiáveis para orientar o tomador de decisão qual seria a melhor aplicação para o uso do biogás dentre as possibilidades disponível para o seu propósito.

Nesse sentido, a abordagem matemática transmite confiabilidade na resolução de problemas complexos, e sua utilização se mostra muito eficiente em estudos que foram aplicadas técnicas estatísticas para controle de qualidade ou em outros que aplicaram modelagem matemática e simulação de cenários para resolver problemas de gestão (JÚNIOR ET AL. 2015).

Métodos multicritérios têm sido utilizados como ferramenta de auxílio à tomada de decisão na seleção de locais para instalação do sistema de tratamento de biomassa. Há também alguns estudos que abordam sobre a aplicação de métodos multicritérios para solucionar problemas mais específicos na tecnologia do biogás como na seleção de biomassa (SEABRA JÚNIOR, COLMENERO, AND BRAGHINI JUNIOR 2020).

Assim, o objetivo deste trabalho foi propor um método que servisse como ferramenta de apoio à tomada de decisão para solucionar o problema de seleção da finalidade de uso do biogás utilizando a abordagem multicritério.



MATERIAL E MÉTODOS

Para aplicar o método para resolver o problema de escolha da finalidade de uso do biogás, é necessário seguir a sequência de etapas apresentada na Fig. 1.

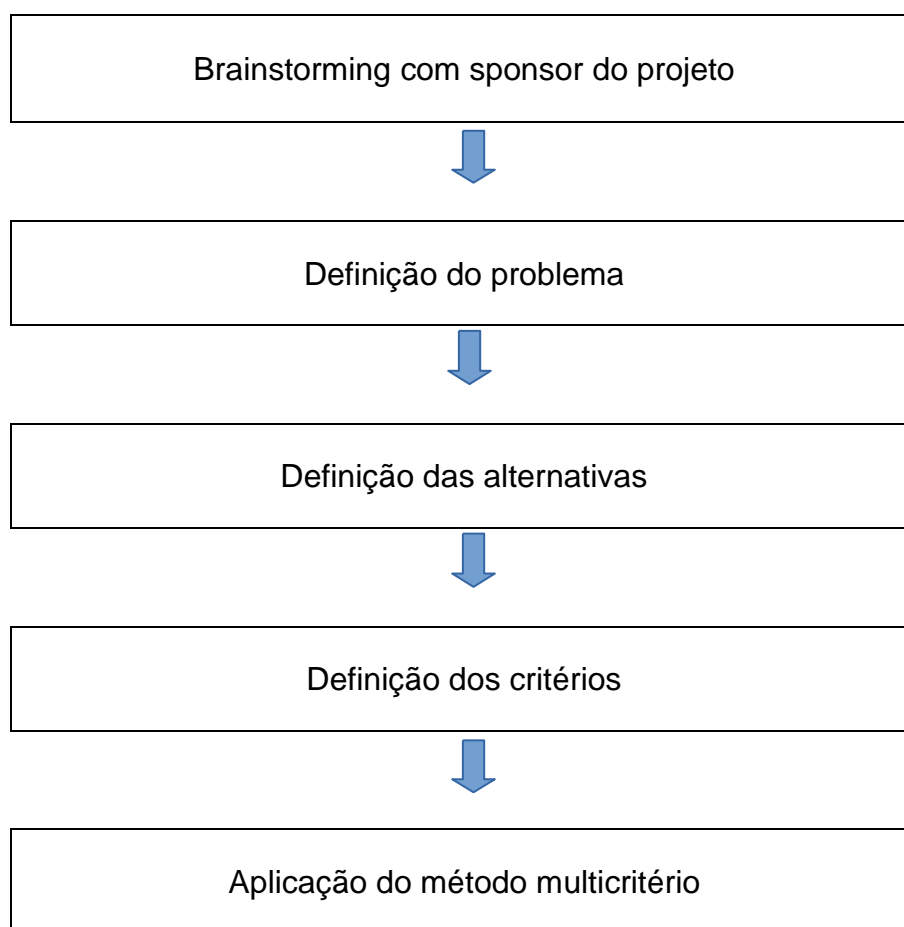


Fig. 1. Etapas de aplicação do método

Primeira etapa – Brainstorming com o Sponsor do projeto

Ao reunir-se com o patrocinador do projeto, o gerente do projeto e o responsável técnico devem expor as principais questões sociais, ambientais, impactos negativos





decorrentes do não tratamento da biomassa animal, além de destacar os benefícios trazidos pelo tratamento da biomassa e a solução de problemas ambientais e benefícios econômicos através da produção de biogás. Além disso, o responsável técnico do projeto deve realizar visitas técnicas no local de instalação do biodigestor para ter uma ideia precisa das características da propriedade, dos animais, da geração de biomassa, das instalações físicas e outras especificidades do local.

Segunda etapa – Definição do problema

Para iniciar a construção estrutural matemática, é necessário definir tecnicamente o problema a ser resolvido: a seleção da melhor alternativa de utilização do biogás. Portanto, é necessário listar todas as alternativas possíveis para o uso do biogás.

Terceira etapa – Definição das alternativas de solução

Nesta etapa, o gerente do projeto estratificará as informações da compilação de alternativas feitas na etapa anterior, com todas as possibilidades de uso do biogás, em número menor para ser considerado possível de instalação, de acordo com as especificidades financeiras, estruturais e projeto da propriedade onde será produzido o biogás. Como referência, sugerimos as possibilidades mais comuns de utilização do biogás para qualquer dimensão de propriedade e projeto como queima simples, produção de biocombustível, cogeração, venda de energia.

Quarta etapa – Definição de critérios

A definição dos critérios é uma etapa puramente técnica do projeto. As informações e características particulares do local de instalação do biodigestor coletadas durante as visitas técnicas realizadas pelo técnico responsável e sua equipe (realizadas na etapa 1) servirão de base.

Quinta etapa – aplicação do método multicritério

O método multicritério escolhido deve ser compatível com as características do problema que quero resolver. Dependendo do número de alternativas, critérios ou da relação entre eles, o método multicritério pode ser outro, sempre buscando manter um alto nível de confiabilidade nos resultados encontrados.



Devido a essa relação compensatória entre os critérios, é necessário estabelecer uma relação de importância entre eles, para isso, aliado ao Fuzzy-Topsis, o método AHP, proposto por (Saaty 1987), para determinar os pesos dos critérios

Esse método baseia-se nas respostas de um questionário contendo comparações pareadas entre os critérios, por meio de uma escala gradual denominada escala Saaty. Essa escala varia de 1 a 9, onde um significa que os critérios são igualmente importantes e nove significa que um critério é mais importante que o outro.

As comparações pareadas dos critérios formam a matriz de decisão, semelhante à Tabela 1, e a partir daí são realizadas as iterações até encontrar o valor dos pesos dos critérios.

Tabela 1 - Estrutura genérica padrão de qualquer matriz de decisão para começar a aplicar o método multicritério

C1	C2	...	Cn
A1	X11	...	x1 _n
A2	X21	...	x2 _n
Am	x _m 1	...	x _{mn}

A resposta do questionário retorna uma matriz de comparação aos pares dos critérios, ou seja, se o valor de $a_{ij} > 0$, then $a_{ij} = \frac{1}{a_{ij}}$.

Então, o autovetor principal é determinado através da média do valor normalizado. Para verificar a consistência dos julgamentos, é calculado o (razão de consistência), conforme mostrado nas Eqs. (1) e (2):

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (1)$$

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n-1)} \quad (2)$$

Em que:

CR: proporção de consistência;

CI: índice de consistência;

RI : índice randomico;

λ_{max} : maior autovetor;

n : índice da matriz.

O método Fuzzy trabalha com uma escala de variáveis linguísticas com uma escala de valores trapezoidal Fuzzy. Dessa forma, é possível avaliar critérios e alternativas que dão origem a uma certa dificuldade de serem quantificados diretamente em valores numéricos ou que só poderiam ser avaliados qualitativamente e depois convertê-los em valores numéricos ordenando as alternativas usando o Método Topsis.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aplicação

Para demonstrar a utilização do método, foi feita uma aplicação em um estudo de caso, em que o problema consistia em selecionar a finalidade de uso mais adequada para o biogás, levando em consideração as características da propriedade, entre quatro alternativas: queima simples, produção de biocombustível, cogeração, venda de energia.

A aplicação foi realizada referente à estrutura física e de projeto para instalação do biodigestor para tratamento da biomassa gerada na atividade de suinocultura em uma pequena propriedade rural localizada na região oeste do Estado do Paraná - Brasil.

O problema era encontrar a melhor alternativa de uso para o biogás levando em consideração sete critérios: potencial econômico (maximizar), o volume de biogás (maximizar), qualidade do biogás (maximizar), potencial energético (maximizar), potencial combustível (maximizar), custos do projeto (minimizar) e estrutura física (minimizar); e quatro alternativas: queima simples (A1), produção de biocombustíveis (A2) cogeração (A3) venda de energia (A4). A relação hierárquica entre o problema, critérios e alternativas é mostrada na Fig.4.

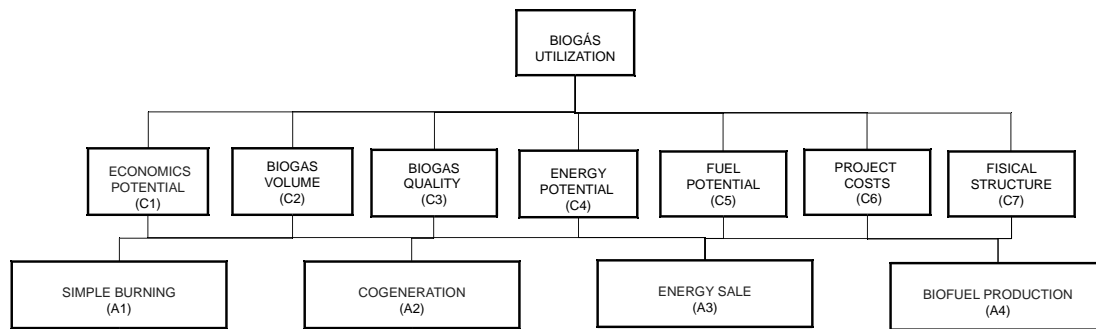


Fig. 4. A estrutura hierárquica do problema.

Para iniciar a aplicação, é aplicado o método AHP para obter os pesos dos critérios. Na avaliação junto aos critérios, três especialistas em biogás analisaram os critérios segundo a escala Saaty. O resultado obtido pelos pesos e índice de consistência (CR) é mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultado da aplicação do método AHP com valores de peso para os critérios e índice de consistência.

Criteria	Economics potencial C1	Biogas volume C2	Biogas quality C3	Energy potential C4	Fuel potential C5	Project costs C6	Fiscal structure C7
Weights	0.36303	0.2358	0.17621	0.06708	0.0402	0.09162	0.02606

*CR = 0.09322. thus CR ≤ 0. 1, indicates consistency of the weight values obtained

Em seguida, aplicou-se o método Fuzzy-Topsis, que inicialmente passa pela avaliação dos critérios por meio de variáveis linguísticas. Para realizar essa avaliação, três especialistas que atuam em diferentes segmentos da tecnologia do biogás: uma consultoria em energia renovável, um administrador de condomínio de bioenergia e um engenheiro de energia renovável

Após a conversão da matriz de decisão em variáveis linguísticas em números Fuzzy, são realizadas etapas iterativas para ordenação pelo método Topsis. Essas etapas relacionam os valores avaliados para os pesos às alternativas, construindo uma matriz de decisão com os valores correspondentes. É possível encontrar uma solução ideal para cada alternativa expressa na Tabela 3 e uma solução anti-ideal descrita na Tabela 4.

Tabela 3 - Matriz de resultados para a solução ideal para cada alternativa

Dij*	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	d*
A1	0.389	0.227	0.193	0.026	0.039	0.000	0.019	0.892
A2	0.083	0.054	0.082	0.015	0.037	0.000	0.019	0.290
A3	0.040	0.026	0.082	0.007	0.037	0.000	0.023	0.215
A4	0.350	0.138	0.179	0.065	0.046	0.000	0.025	0.803

Tabela 4 - Matriz de resultados para solução anti-ideal para cada alternativa

Dij-	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	d-
A1	0.047	0.059	0.016	0.057	0.008	0.093	0.013	0.293
A2	0.364	0.236	0.132	0.067	0.009	0.070	0.012	0.892
A3	0.401	0.260	0.132	0.074	0.009	0.037	0.008	0.921
A4	0.091	0.147	0.033	0.017	0.001	0.093	0.006	0.389

Em seguida, determina-se o coeficiente de proximidade real; ou seja, quanto mais próximo o valor de cada alternativa estiver da opção com a solução ideal, ela estará mais próxima de 1 e será melhor classificada. Os resultados dessas iterações com a primeira classificação são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Ordenação 1

Code	Alternatives	(d-) + (d*)	Q	RANK
A1	Simple burning	8.2233	2.7096	2
A2	Cogeneration	8.0542	1.5387	3
A3	Energy sale	7.6183	1.5203	4
A4	Biofuel production	8.2252	3.1707	1

Em seguida, aplicamos os pesos obtidos pelo método AHP nas respectivas alternativas, o que nos leva a uma classificação final expressa na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultado final após a aplicação dos pesos AHP

Code	Alternatives	(d-) + (d*)	Q	RANK
A1	Simple burning	1.1857	4.0426	1
A2	Cogeneration	1.1822	1.3257	3
A3	Energy sale	1.1363	1.2333	4
A4	Biofuel production	1.1915	3.0632	2



A primeira classificação significa as iterações Fuzzy-Topsis sem considerar os pesos obtidos pelo método AHP e funciona para demonstrar como o uso dos pesos é importante para estabelecer um refinamento na ordem obtida.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os resultados obtidos na aplicação do método proposto para este trabalho no estudo de caso para resolver o problema de seleção do uso do biogás. Considerados os critérios potencial econômico, volume de biogás, qualidade do biogás, potencial energético, potencial combustível, custos do projeto e estrutura física, obteve-se a seguinte ordem de preferência para as alternativas: queima simples > produção de biocombustível > cogeração > venda de energia.

Assim, por meio da análise de sensibilidade, foi possível concluir e verificar a consistência dos resultados do método. Como contribuição teórica, destaca-se o uso de métodos multicritérios para resolução de problemas, incluindo o uso de biogás.

Do ponto de vista prático, o método apresentado difere dos métodos empíricos tradicionais. A preocupação mais significativa está concentrada na produção simples de biogás, sem antes considerar cenários específicos e várias possibilidades razoáveis da propriedade onde o sistema biodigestor está instalado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro à pesquisa

REFERÊNCIAS

- Ammenberg, Jonas, Stefan Anderberg, Tomas Lönnqvist, Stefan Grönkvist, and Thomas Sandberg. 2018. "Biogas in the Transport Sector—Actor and Policy Analysis Focusing on the Demand Side in the Stockholm Region." *Resources, Conservation and Recycling* 129 (September 2017): 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.010>.
- B. Abada, A. Saidi. 2007. "La Biométhanisation : Une Solution Pour Un Développement Durable." *Revue CER'07 Ouj*: 31–35. <https://www.cder.dz/spip.php?article1054>.



- Chen, Hong Lei, Gui Hua Yang, Jia Chuan Chen, and Yu Liu. 2013. "Establishment of Methanogenesis Dynamics Model in the Process of Methane Fermentation with Manure Wastewater." *Advanced Materials Research* 724–725: 378–82. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.724-725.378>.
- Chen, Yu, Wei Hu, Paul Chen, and Roger Ruan. 2017. "Household Biogas CDM Project Development in Rural China." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67: 184–91. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.052>.
- Cheng, Lai T C E, Chia-hsun Chang Jingjing, Xu Dong-ping Song, Chia-hsun Chang Jingjing, Xu Dong-ping Song, Ananda Mukherji, Ashay Desai, and For Authors. 2015. "Management of Environmental Quality : An International Journal Article Information :"
Management Decision 39 (3): 233–43. <https://doi.org/10.1108/EUM0000000005454>.
- Clemens, Harry, Rob Bailis, Anne Nyambane, and Victoria Ndung'u. 2018. "Africa Biogas Partnership Program: A Review of Clean Cooking Implementation through Market Development in East Africa." *Energy for Sustainable Development* 46: 23–31. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.05.012>.
- Gesta, Plaza De La, Life Cycle, and Impact Assessment. 2019. "Evaluation of the Synergies in Cogeneration with Steel Waste Gases Based on Life Cycle Assessment : A Combined Coke Oven and Steelmaking Gas Case Study" 217: 576–83. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.262>.
- Hagman, Linda, and Mats Eklund. 2016. "The Role of Biogas Solutions in the Circular and Bio-Based Economy" BRC Raport: 32. <http://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1161103/FULLTEXT01.pdf>.
- Harsono, Soni Sisbudi, Philipp Grundmann, and S. Soebronto. 2014. "Anaerobic Treatment of Palm Oil Mill Effluents: Potential Contribution to Net Energy Yield and Reduction of Greenhouse Gas Emissions from Biodiesel Production." *Journal of Cleaner Production* 64: 619–27. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.056>.
- Hoppe, Thomas, and Ph Th Maurits Sanders. 2014. "Agricultural Green Gas Demonstration Projects in the Netherlands. A Stakeholder Analysis." *Environmental Engineering and Management Journal* 13 (12): 3083–96. <https://doi.org/10.30638/eemj.2014.347>.
- Júnior, E S, A Feiden, R F Santos, J Siqueira, C Schmidt, and G Proença. 2017. "Statistical and Quality Control Tools Applied to the Process of Wooden Furniture Production." *International Wood Products Journal*. <https://doi.org/10.1080/20426445.2017.1337287>.
- JúNior, Edward Seabra, Daniella Negrão, José Airton A. dos Santos, and Carla Adriana Pizarro Schmidt. 2015. "Simulation Application, Design of Experiments, and

Optimization in the Management of the Operational Dynamics of a Basic Health Unit." *Espacios* 36 (11): 1–13.

Kamp, Linda Manon, and Esteban Bermúdez Forn. 2016. "Ethiopia's Emerging Domestic Biogas Sector: Current Status, Bottlenecks and Drivers." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60: 475–88. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.068>.

Kasiri, S. Mah, F. ZHANG, C. Haveroen, M. Ellsworth, S. Ulrich, A. 2012. "Anaerobic Processes." *Water Environment Research* 84 (4): 398–406. <https://doi.org/10.2175/106143012X13407275694914>.

Khan, Ershad Ullah, Brijesh Mainali, Andrew Martin, and Semida Silveira. 2014. "Techno-Economic Analysis of Small Scale Biogas Based Polygeneration Systems: Bangladesh Case Study." *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 7: 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2014.03.004>.

Khan, Ershad Ullah, and Andrew R. Martin. 2016. "Review of Biogas Digester Technology in Rural Bangladesh." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 62: 247–59. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.044>.

Liou, James J.H., and Gwo Hshiong Tzeng. 2012. "Comments on 'Multiple Criteria Decision Making (MCDM) Methods in Economics: An Overview.'" *Technological and Economic Development of Economy* 18 (4): 672–95. <https://doi.org/10.3846/20294913.2012.753489>.

Martin, Michael. 2015. "Potential of Biogas Expansion in Sweden: Identifying the Gap between Potential Studies and Producer Perspectives." *Biofuels* 6 (5–6): 233–40. <https://doi.org/10.1080/17597269.2015.1090769>.

Mejdoub, Hend, and Hatem Ksibi. 2014. "Regulation of Biogas Production Through Waste Water Anaerobic Digestion Process: Modeling and Parameters Optimization." *Waste and Biomass Valorization* 6 (1): 29–35. <https://doi.org/10.1007/s12649-014-9324-5>.

Nevzorova, Tatiana, and Vladimir Kutcherov. 2019. "Barriers to the Wider Implementation of Biogas as a Source of Energy: A State-of-the-Art Review." *Energy Strategy Reviews* 26: 100414. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100414>.

Saaty, R. W. 1987. "The Analytic Hierarchy Process-What It Is and How It Is Used." *Mathematical Modelling* 9 (3–5): 161–76. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8).

Scarlat, Nicolae, Fernando Fahl, Jean François Dallemand, Fabio Monforti, and Vincenzo Motola. 2018. "A Spatial Analysis of Biogas Potential from Manure in Europe." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 94 (June): 915–30. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.035>.

Seabra Júnior, Edward, João Carlos Colmenero, and Aldo Braghini Junior. 2020. "Biomass Selection Method to Produce Biogas with a Multicriteria Approach." *Waste and Biomass Valorization*. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01231-x>.

Zola, Fernanda Cavicchioli, João Carlos Colmenero, Franciely Velozo Aragão, Thaisa Rodrigues, and Aldo Braghini Junior. 2020. "Multicriterial Model for Selecting a Charcoal Kiln." *Energy* 190: 116377.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116377>.

Zubaryeva, Alyona, Nicola Zaccarelli, Cecilia Del Giudice, and Giovanni Zurlini. 2012. "Spatially Explicit Assessment of Local Biomass Availability for Distributed Biogas Production via Anaerobic Co-Digestion - Mediterranean Case Study." *Renewable Energy* 39 (1): 261–70. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.08.021>.

Abstract: *Biogas is a product of the anaerobic biodigestion process and can be used in various applications; In general, the most common are: burning for transmission, cogeneration, electricity production, biofuel. Having a vast possibility of using biogas, the decision maker must choose a more practical purpose for each project. Therefore, a selection problem arises. The wrong choice of intention use of biogas can have profound implications, such as an increase in costs, physical facilities or incompatible with the rural property or objective of the rural producer, need for a hand of specialized technical work not available in the region, and may even make the project unfeasible. To solve this, the work had as objective to bring a method to support the decision of selection or use of biogas utilities. The technique consists of a procedure of 6 steps together with the application of three multi-criteria methods, the AHP (Analytic Hierarchy Process) and Fuzzy-Topsis. To demonstrate application, a case study was carried out, considering four basic alternatives for the use of biogas: simple flaring, production biofuels, cogeneration, energy sales; and seven criteria: economic potential, volume of biogas, quality of biogas, potential energy, fuel potential, project cost, structure physics. The results allow you to classify as alternatives and define a hierarchical order among them.*

Keywords: *biogas, cogeneration, biofuel, bioenergy*