

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/372

Análise Multicritério do Combustível Derivado de Resíduos (CDR) e Tecnologias de Tratamento Térmico de Resíduos Sólidos Urbanos

Flávio Leônico Guedes ¹
Doutorando, UFPE, Recife-PE, Brasil, f_l_guedes@hotmail.com

Antônio Italcly de Oliveira Júnior ¹
Doutor, UFPE, Recife-PE, Brasil, antonioitalcly@hotmail.com

Clezianny Freire Silva ²
Especialista, FAB, Recife-PE, Brasil, cleziannyfcs@fab.mil.br

Soraya Giovanetti El-Deir ³
Doutora, URFPE, Recife-PE, Brasil, sorayaeldeir@gmail.com

José Fernando Thomé Jucá ¹
Doutor, UFPE, Recife-PE, Brasil, jucah@ufpe.br

RESUMO: Dentre as diferentes formas de destinação resíduos sólidos urbanos, o aterro sanitário, atualmente, é a modalidade mais utilizada e disseminada. Os resíduos passíveis de recuperação energética classificam-se como fonte alternativa de energia para todos os efeitos previstos na legislação. Nos últimos anos, novas tecnologias de gerenciamento de resíduos permitem que estes sejam transformados, passando a ter valor econômico, diminuindo a disposição em aterros. O processo metodológico deste estudo visou verificar o potencial de produção de CDR no município de Pernambuco e comparar com outras tecnologias de tratamento térmico de resíduos através de análise multicritério. O processo de tomada de decisão incluiu os critérios para determinação das prioridades de acordo com graus de importância. O método escolhido para auxiliar a tomada de decisão de escolha da melhor alternativa é baseado nos conceitos do processo de Análise Hierárquica de Processos (AHP). Os resultados encontrados na aplicação do método multicritério para avaliar as tecnologias de tratamento indicou que em ordem de importância gerada pelo processo matemático AHP o fator econômico ficou em primeiro lugar com 55,6%, seguido do ambiental com 20,0%, o técnico com 19,5% e por último o critério social 4,8%.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento Térmico, RSU, CDR.

ABSTRACT: Among the different forms of disposal of urban solid waste, landfilling is currently the most used and widespread modality. Waste subject to energy recovery is classified as an alternative source of energy for all purposes provided for in legislation. In recent years, new waste management technologies allow waste to be transformed, becoming economically valuable, limiting disposal in landfills. The methodological process of this study aims to verify the potential for RDF production in the municipality of Pernambuco and compare it with other waste thermal treatment technologies through multi-criteria analysis. The decision-making process included criteria for determining priorities according to degrees of importance. The method chosen to assist decision-making in choosing the best alternative is based on the concepts of the Hierarchical Process Analysis (AHP) process. The results found in the application of the multi-criteria method to evaluate treatment technologies indicated that in order of importance generated by the AHP mathematical process, the economic factor came first with 55.6%, followed by the environmental factor with 20.0%, the technical factor with 19.5% and finally the social classifieds 4.8%.

KEYWORDS: Heat Treatment, MSW, RDF

1 INTRODUÇÃO

A questão do crescimento da produção de resíduos sólidos urbanos (RSU) é uma preocupação em todos os municípios do Brasil. Esse fenômeno vem ganhando relevância no campo da engenharia civil. O tema da preservação ambiental decorrentes do crescimento urbano tem sido objeto de discussão por meio de abordagens multidisciplinares, incluindo a Geotecnia, em conjunto com outras disciplinas como Química e Biologia (GUEDES, 2022).

A gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) tornou-se um desafio significativo para os administradores públicos municipais. Eles têm a responsabilidade pela administração desses resíduos, quer sejam originários de domicílios ou provenientes da limpeza urbana. Essa responsabilidade está estipulada nas Diretrizes Nacionais para o Saneamento Básico, Lei nº 11.445, que exige a integração dos planos de resíduos sólidos aos Planos Municipais de Saneamento, e na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305. A PNRS estabelece os princípios, diretrizes e instrumentos para a gestão dos RSU, fornecendo um arcabouço legal para lidar com esse desafio em crescimento.

Entre as diversas formas de destinação de RSU, o aterro sanitário é atualmente o método mais comum e amplamente utilizado (FUGII, 2019). Porém, de acordo com as diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), os aterros são uma opção para a disposição final dos rejeitos. A lei também estabelece uma hierarquia para as formas de destinação de resíduos, incluindo reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação e aproveitamento energético, ou outras alternativas aprovadas pelos órgãos ambientais (JUCA *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2020; COSTA, 2020).

A tecnologia de tratamento térmico de resíduos vem se destacando como uma solução para os desafios associados aos resíduos sólidos, vem sendo uma importante abordagem na modernização dos sistemas de gestão de resíduos sólidos urbanos. Embora ofereça diversas vantagens, como a redução de resíduos e a produção de energia, a preocupação com as emissões de poluentes atmosféricos é um desafio significativo, requerendo atenção e o cumprimento rigoroso dos limites de emissão para mitigar possíveis impactos ambientais (ALBUQUERQUE *et al.*, 2024).

Cenários futuros de gestão de RSU apontam como promissores as alternativas para minimizar impactos na gestão de RSU. Partindo da hipótese principal de que a valorização energética dos resíduos através da produção de combustível derivado de resíduos (CDR), sendo uma alternativa menos impactante durante a gestão, se comparada a uma disposição final sem tratamento.

Para Jucá *et al.* (2014), uma solução para essa questão: aproveitar os resíduos não recicláveis, mas com potencial energético, convertendo-os em CDR, que pode ser empregado, por exemplo, na indústria cimenteira. Na produção de cimento, por exemplo, o CDR substitui combustíveis fósseis não renováveis, como o coque de petróleo, sendo a segunda opção mais utilizada no setor (VISEDÓ; PECCHIO, 2019).

Embora a indústria cimenteira seja vital para a economia global, seu processo produtivo consome quantidades significativas de combustíveis e eletricidade, contribuindo com até 7% das emissões de CO₂ no Brasil (ARAÚJO, 2020). Assim, estudos para determinar a melhor abordagem para o tratamento térmico de RSU e comparar com outras tecnologias de tratamento, analisando os possíveis impactos associados ao uso de combustíveis alternativos como o CDR, pode ser uma ferramenta valiosa.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é realizar uma análise multicritério utilizando o método Analytic Hierarchy Process (AHP), para auxiliar na indicação da melhor alternativa de tratamento térmico de resíduos sólidos, de acordo com a critérios previamente estabelecidos.

2 METODOLOGIA

O processo metodológico avaliou o potencial de produção de Combustível Derivado de Resíduos do município estudado e comparou com outras tecnologias de tratamento térmico de Resíduos Sólidos Urbanos por meio de uma análise multicritério. A tomada de decisão considerou critérios estabelecidos com diferentes níveis de importância. Para auxiliar nessa escolha, adotou-se o método da Análise Hierárquica de Processos - AHP (SAATY; VARGAS, 2001), reconhecido como uma ferramenta eficaz na tomada de decisão entre várias alternativas (COSTA, 2006). Esse método permitiu comparar diferentes alternativas de forma estruturada, hierarquizando-as de acordo com sua prioridade.

O método AHP foi refinado com base nas necessidades específicas do problema proposto, seguindo uma sequência de etapas que incluíram a formulação do problema, levantamento dos critérios, análise de especialistas, modelagem do problema utilizando o método AHP e obtenção do resultado. A análise foi conduzida em duas fases: a primeira consistiu na avaliação dos critérios de viabilidade para o tratamento térmico de RSU, enquanto a segunda envolveu a análise do potencial de produção do município, considerando a caracterização dos resíduos e sua viabilidade, conforme definido por especialistas.

Nesta pesquisa foram estabelecidos critérios comumente empregados para este tipo de análise, incluindo aspectos ambientais, econômicos, sociais e técnicos. No que diz respeito às tecnologias de tratamento térmico, foram consideradas estratégias específicas, como o coprocessamento de CDR, incineração, gaseificação e pirólise. Em seguida foi criada uma árvore hierárquica, analisando as diferentes alternativas e atribuindo pesos aos critérios e subcritérios. Essa atribuição foi realizada por especialistas que possuem expertise no tema, a partir de sessões de brainstorming (Figura 1).

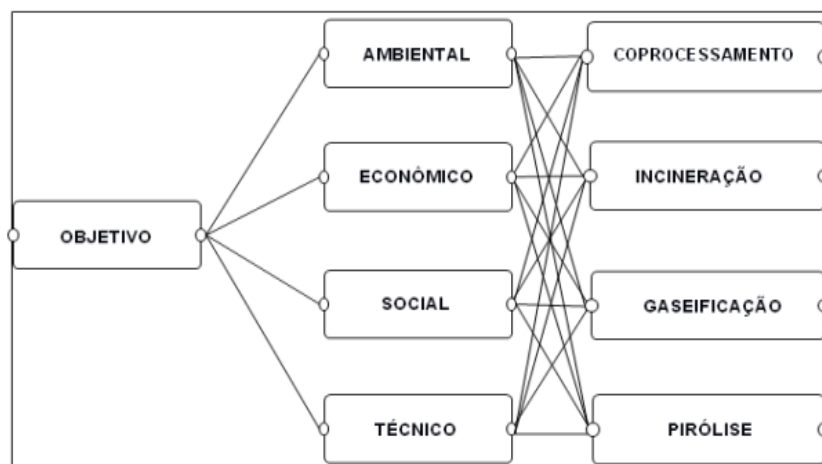


Figura 1. Árvore hierárquica para a análise do Potencial Energético

Após um minucioso levantamento bibliográfico e de campo sobre as características relevantes para a viabilidade técnica na produção de CDR, foi identificado seis critérios fundamentais: poder calorífico inferior, número de habitantes, índice de sustentabilidade urbana, distância entre o município e o mercado consumidor de CDR, quantidade de RSU gerados e composição gravimétrica dos RSU. Esses critérios foram avaliados com base nos resultados esperados pelos autores, possibilitando a formulação do problema em relação ao potencial municipal. Para estabelecer as preferências conforme os critérios técnicos previamente definidos, foi realizado um questionário preenchido por especialistas da área de tratamento de resíduos. Em seguida, determinaram-se as preferências para cada um dos seis critérios considerados, ou seja, o grau de importância de cada um em relação aos demais. Os especialistas atribuíram valores em uma escala de 1 a 5, indicando 1 como menos importante e 5 como mais importante (ALVES; ALVES, 2015).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Prioridades de Critérios

A preferência dos especialistas para cada critério em relação ao objetivo principal foi determinada por meio de comparações em pares, analisando as alternativas lado a lado e indicando aquela que melhor atende ao critério (conforme demonstrado na Tabela 1). Dessa forma, foi possível calcular as prioridades dos critérios de acordo com a escala fundamental de julgamentos comparativos (SAATY; VARGAS, 2001). Seis comparações em pares foram analisadas, conforme a Equação 1:

$$(n^2 - n)^{-1} \quad (1)$$

Onde: n = ordem da matriz.

Tabela 1. Matriz de comparação de paridade dos critérios

Critérios para o Objetivo	Ambiental	Econômico	Social	Técnico
Ambiental	1,00	0,20	7,00	1,00
Econômico	5,00	1,00	7,00	3,00
Social	0,14	0,14	1,00	0,20
Técnico	1,00	0,33	5,00	5,20
Somatório	7,14	1,68	20,00	5,20

A tabela foi normalizada dividindo o valor de cada célula pela soma da respectiva coluna (Tabela 2). Com a tabela da matriz normalizada, obtém-se o vetor de prioridade dos critérios, calculando a média dos valores de cada critério.

Tabela 2. Comparação Normalizada dos Critérios Estabelecidos

Critérios para o Objetivo	Ambiental	Econômico	Social	Técnico
Ambiental	0,140	0,119	0,192	0,200
Econômico	0,700	0,597	0,577	0,556
Social	0,020	0,085	0,038	0,048
Técnico	0,140	0,199	0,192	0,195

A comparação normalizada permitiu a avaliação da classificação dos critérios com base no vetor de prioridade calculado. De acordo com Alves e Alves (2015), quanto maior a média das linhas, maior o nível de preferência. Assim, para o atributo "tecnologia de tratamento do RSU", os quatro critérios, em ordem de importância determinada pelo processo matemático do AHP (quanto maior a pontuação, maior o nível de preferência), são: Econômico (55,6%); Ambiental (20,0%); Técnico (19,5%) e Social (4,8%).

A ênfase dos especialistas no critério econômico como fator primordial destaca a importância de avaliar a viabilidade financeira, dado o alto custo de investimento na tecnologia de tratamento térmico de RSU em comparação com o seu descarte em aterros sanitários. Conforme apontado por Mamede (2013), a tarifa de tratamento para aterros no Brasil é relativamente baixa em comparação com países europeus, os quais aumentam os custos de disposição em aterros como estímulo para adotar práticas alternativas, como o tratamento.

A implementação de processos tecnológicos de tratamento e recuperação resulta em menores impactos ambientais ao longo de seu ciclo de vida, incluindo economia de energia (MERSONI; REICHERT, 2017). Essa realidade é evidente nos critérios ambientais e técnicos, os quais apresentam quase a mesma prioridade indicada pelos profissionais da área, especialmente em relação ao uso de energia.

Embora o nível de preferência em relação ao critério social seja menor, segundo a avaliação dos especialistas, em comparação com o critério de escolha da implantação de tecnologias para o uso de RSU energéticos, é importante notar que essas tecnologias têm impactos positivos para a sociedade. O aproveitamento de RSU como fonte de energia não apenas gera empregos diretos e indiretos, mas também contribui para a eliminação de aterros sanitários e para a melhoria da saúde pública (ABLP, 2019).

3.2 Análise de Consistência

Após as comparações de paridade, verificou-se a consistência dos julgamentos. Segundo Saaty (1990), o método AHP calcula a razão de consistência (CR) comparando o índice de consistência (IC) da matriz com os julgamentos, com o índice de consistência de uma matriz do tipo aleatório (IR). Com a matriz de julgamentos e prioridades, as prioridades são utilizadas como peso para cada coluna (Tabela 3).

Tabela 3. Matriz de Comparação com Pesos Atribuídos

Critérios para o Objetivo	Ambiental	Econômico	Social	Técnico
Ambiental	0,140	0,119	0,350	0,192
Econômico	0,700	0,597	0,350	0,577
Social	0,020	0,199	0,250	0,038

Técnico	0,140	0,556	0,048	0,192
Peso	0,200	0,556	0,048	0,195

O índice geral de preferência para cada um dos critérios foi calculado multiplicando os vetores de preferência para cada um dos critérios, pelos pesos dos próprios critérios, somando os produtos (tabela 4).

Tabela 4. Índice de Preferência Geral

Critérios para o Objetivo	Ambiental	Econômico	Social	Técnico
Ambiental	0,028	0,066	0,017	0,149
Econômico	0,140	0,332	0,017	0,602
Social	0,004	0,047	0,002	0,061
Técnico	0,028	0,111	0,012	0,188

Em seguida, cada um dos valores resultantes foi dividido pelos pesos correspondentes, que são os vetores preferidos (Tabela 5). Assim, foi possível calcular o estimador de autovalor máximo de julgamento (λ).

Tabela 5. Estimador de Autovalor

Soma dos Pesos	Prioridades	Peso/Prioridade
0,260	0,200	0,769
1,091	0,556	0,510
0,114	0,048	0,421
0,339	0,195	0,575

O total calculado da razão peso / prioridade dividido pela ordem da matriz (4) é igual a $\lambda_{\max} = 2,275$. O Índice de Consistência (IC) foi calculado pela seguinte fórmula: $IC = |(\lambda_{\max} - n)| / (n-1)$. O valor calculado do IR é dado na tabela 2, então $IC = 0,575$. Assim, por se tratar de uma matriz (4x4), pois possui 4 critérios comparados par a par, portanto, a inconsistência máxima permitida pela escala de Saaty é de 0,9. O valor resultante da razão de consistência RC para IC / IR foi de 0,575. Portanto, o grau de consistência para o caso estudado foi satisfatório, uma vez que $IC / IR < 0,9$.

3.3 Prioridade de alternativas de Tratamento

As prioridades das alternativas foram determinadas por meio de comparações entre pares, seguindo o mesmo método de cálculo dos critérios para atingir o objetivo principal, indicando a melhor alternativa que atende ao critério estabelecido (Figura 2).

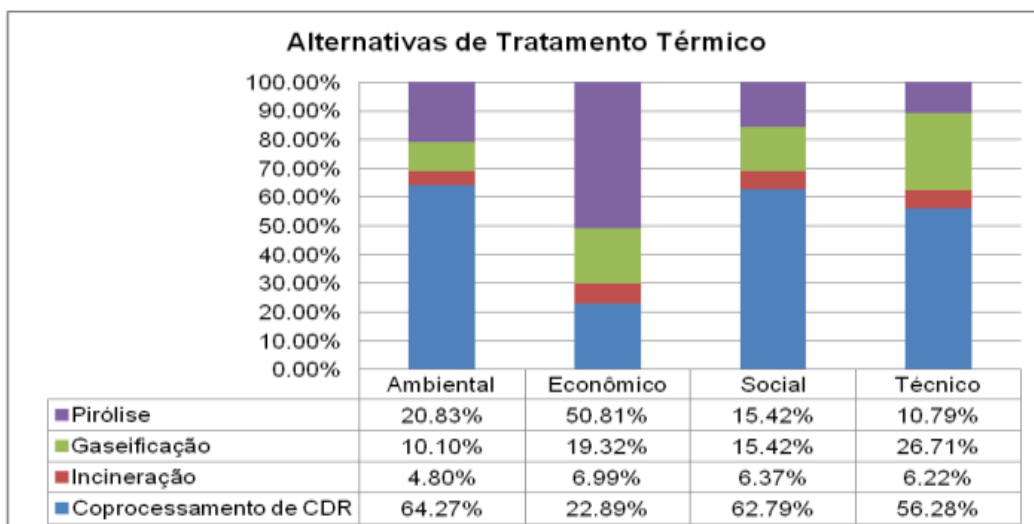


Figura 2. Prioridades das alternativas de tratamento térmico pelos critérios

Portanto, as quatro alternativas, em ordem de importância de acordo com os quatro critérios, geradas pelo processo matemático do AHP (quanto maior a pontuação, maior o nível de preferência), são:

- Ambientais: coprocessamento CDR, pirólise, gaseificação e incineração;
- Econômico: Pirólise, Coprocessamento de CDR, Gaseificação e Incineração;
- Social: Coprocessamento CDR, Pirólise, Gaseificação e Incineração;
- Técnico: Coprocessamento de CDR, Gaseificação, Pirólise e Incineração.

A incineração foi considerada menos viável em todos os critérios analisados, uma vez que o coprocessamento de CDR apresentou maior viabilidade nos critérios ambientais, sociais e técnicos, e no critério econômico ocupa o segundo lugar entre as tecnologias de tratamento.

4 CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo analisar tecnologias de tratamento térmico de RSU utilizando a Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão - AHP, para avaliar a técnica mais viável e verificar o potencial energético de produção de CDR. Os resultados encontrados na aplicação do método multicritério para avaliação das tecnologias de tratamento mostraram-se consistentes e podem ser utilizados pelos municípios para auxiliar na tomada de decisões com base nas avaliações que especialistas da área fizeram sobre cada item que compõe o modelo.

Como, por exemplo, no caso dos critérios estabelecidos em ordem de importância gerados pelo processo matemático do AHP foi o econômico com 55,6%, seguido do ambiental com 20,0%, o técnico com 19,5% e para este último o critério social de 4,8%. Em relação às quatro alternativas estabelecidas, em ordem de importância segundo os quatro critérios, o Coprocessamento de CDR obteve maior pontuação nos critérios ambientais, sociais e econômicos e em segundo lugar no critério econômico. A utilização de aterros sanitários é um recurso para disposição final, depois de esgotadas todas as possibilidades de recuperação e tratamento disponíveis e economicamente viáveis.

Nesse contexto, o Combustível Derivado Recusado, por todas as suas características e pelo crescimento da produção de RSU nos municípios, conduz ao cenário de combustível mais promissor, pelos benefícios econômicos e socioambientais. Portanto, o aproveitamento energético da energia proveniente dos RSU é uma tecnologia com grande potencial de sustentabilidade ao estabelecer um combustível com potencial para substituir fontes de combustível derivadas do petróleo, reduzindo também a quantidade de resíduos dispostos em aterros sanitários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABLP. Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública. Revista Limpeza Pública. Ed. nº 102. Publicação trimestral da 3º trimestre. São Paulo. 2019. [https:// www.ablp.org.br](https://www.ablp.org.br)
- ALBUQUERQUE, M. DA S., MOREIRA, Y. W. N., FIGUEREDO, B. L. E, PAIVA, B. K. V., STEFANUTTI, R., & SILVA, F. J. A. da. Waste-to-Energy: potencialidades e contextualização da sua aplicação no Brasil. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES*, 17(4), e5871. 2024 <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.4-001>
- ALVES, J. R. X.; ALVES, J. M. Definição de localidade para instalação industrial com o apoio do método de análise hierárquica (AHP). *Production*, v. 25, n. 1, p. 13-26, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132014005000023>
- BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece Diretrizes Nacionais para o Saneamento Básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. Brasília, DF, 2007.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n o 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF, 2010.
- COSTA, H. G. Auxílio multicritério à decisão: método AHP. Rio de Janeiro: Abepro, 2006.
- COSTA, A.R.S.; SILVA, R. C. P.; JUCÁ, J. F. T.; EL-DEIR, S.G. Aplicação da pegada ecológica na gestão de resíduos sólidos urbanos através de análise de componentes principais: Estudo da cidade de Recife, Brasil. *Revista aidis de ingeniería y ciencias ambientales*, v. 13, p. 320-333, 2020. <http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2020.13.2.67115>
- FUGII, G. M. Proposta de um modelo de dinâmica de sistemas aplicado à gestão de resíduos sólidos urbanos domiciliares de Curitiba. 2019. 246 f. Tese (Doutorado em Tecnologia e Sociedade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.
- GUEDES, F. L. Análises do ciclo de vida e emissões de gases na produção e uso de combustível derivado de resíduos sólidos urbanos em Paulista-PE, Brasil. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife. 113 f. 2022
- JUCÁ, J. F. T.; LIMA, J. D.; MARIANO, M. O. H.; FIRMO, A. L. B.; LIMA, D. G. A.; LUCENA, L. F. L.; FARIAS, P. R. R.; JUNIOR, F. H. C.; CARVALHO, E. H.; FERREIRA, J. A.; REICHERT, G. A. Análise das diversas tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão. Jaboatão dos Guararapes: Grupo de Resíduos Sólidos – UFPE, 2014.
- JUCÁ, J. F. T.; BARBOSA, K.R.M.; SOBRAL, M.C. M. Sustainability indicators for municipal solid waste management: A case study of the Recife Metropolitan Region, Brazil. *Waste management & Research*, v. 38, p. 2020. <https://doi.org/10.1177/0734242X20941088>
- MAMEDE, M. C. S. Avaliação Econômica e Ambiental do Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos no Brasil. p.141. Dissertação. Universidade Estadual de Campinas. Campinas-SP, 2013.
- MERSONI, C.; REICHERT, G. A. Comparação de cenários de tratamento de resíduos sólidos urbanos por meio da técnica da Avaliação do Ciclo de Vida: o caso do município de Garibaldi, RS. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. v.22. n.5. 2017. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017150351>
- SAATY, T. L. How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*. v._, n. 48, p. 9-26, 1990
- SATTY, T. L.; VARGAS, L. G. Models, methods, concepts applications of the analytic hierarchy process. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 2001. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4615-1665-1>
- SILVA, R. C. P. ; A.R.S. COSTA ; EL-DEIR, S.G. ; JUCA, J. F.T. Setorização de rotas de coleta de resíduos sólidos domiciliares por técnicas multivariadas: estudo de caso da cidade do Recife, Brasil. *Engenharia sanitária e ambiental (online)*, v. 25, p. 72-84, 2020. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522020200205>

VISEDO, G.; PECCHIO, M. ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro: SNIC, 2019 64 p. 2019