

SELEÇÃO DE BRIQUETADEIRA PARA DENSIFICAÇÃO ENERGÉTICA DE BIOMASSA: APLICAÇÃO DOS MÉTODOS AHP-GAUSSIANO, CRITIC-WASPAS E CRITIC-WISP

 <https://doi.org/10.56238/arev7n2-044>

Data de submissão: 05/01/2025

Data de publicação: 05/02/2025

Marcos Fábio de Jesus

Mestre em Engenharia Química
Programa de Pós Graduação em Energia e Ambiente – PgEnAm
Universidade Federal da Bahia
Salvador, Bahia, Brasil
E-mail: fabiolen@ufba.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3327-4409>
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/8080393985313176>

Marcela Magalhães Marcelino

Doutora em Engenharia Industrial
Laboratório de Energia e Gás – LEN
Universidade Federal da Bahia
Salvador, Bahia, Brasil
E-mail: marcelamagalhaes16@yahoo.com.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0688-3097>
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/0783488783976877>

Francisco Jarmeson Silva Bandeira

Professor do Departamento de Engenharia Mecânica
Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Federal da Bahia
Salvador, Bahia, Brasil
E-mail: francisco.bandeira@ufba.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7392-7403>
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/8080393985313176>

Ednildo Andrade Torres

Professor do Departamento de Engenharia Química
Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Federal da Bahia
Salvador, Bahia, Brasil
E-mail: ednildo@ufba.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0574-5306>
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/2483185411923070>

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo selecionar uma briquetadeira de biomassa para estudos energéticos aplicados nos processos de torrefação contínua e gaseificação na planta piloto da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia. A seleção do equipamento será realizada através dos métodos AHP-Gaussiano, CRITIC-WASPAS e CRITIC-WISP. Foram analisados seis (6) modelos de briquetadeiras,

selecionadas em função de suas características operacionais. Os critérios utilizados na seleção do equipamento foram o custo (R\$), o consumo energético (kW) e a produção (kg/h). Os métodos de apoio à tomada de decisão aplicados foram escolhidos para ordenação por não depender da análise par-a-par dos critérios por parte dos tomadores de decisão. O modelo 03 foi o mais bem posicionado no ordenamento, seguido do modelo 02 e modelo 01. A análise comparativa dos resultados fornecidos mostra que os modelos 03 e 02 apresentaram proximidade nos ordenamentos e que no caso de se aplicar como peso o fator gaussiano normalizado o método WASPAS mostra sensibilidade quanto ao parâmetro λ .

Palavras-chave: Densificação Energética. Biomassa. Briquetadeira. AHP_Gaussiano. CRITIC-WASPAS-WISP.

1 INTRODUÇÃO

A aplicação da biomassa *in natura* ou processada para fins energéticos apesar de não ser algo novo vem ganhando cada vez mais a atenção da comunidade científica no que diz respeito ao aprimoramento de tecnologias já utilizadas (Raj, Tirkey e Jena, 2023) e no desenvolvimento de novos processos (Yang et al., 2023) que aumentem o potencial energético desse insumo renovável.

Por possuir, principalmente, umidade relativamente elevada, em comparação a outros insumos energéticos, e distribuição de tamanho de partículas variada, a biomassa necessita, na maioria dos casos, passar por processos de pré-tratamento para que haja uma melhor eficiência na sua utilização (Carneiro-Junior et al., 2021).

Os processos de peletização, briquetagem e torrefação podem ser destacadas dentre outros quando se pretende adensar energeticamente a biomassa para uso *in situ* ou para transporte e posterior aplicação (Prakash Kumar et al., 2019). Neste caso, a densificação energética da biomassa se mostra atrativa por tornar a modalidade de transporte mais eficiente já que uma maior quantidade de energia por unidade de volume será deslocada.

O transporte da biomassa é uma importante etapa na cadeia energética desse insumo, uma vez que a sua aplicação, de maneira geral, não ocorre no local de sua produção. A viabilidade econômica de processos produtivos intensivos em energia, que pretendem utilizar a biomassa como insumo, depende fortemente desta etapa. Assim, transportar uma biomassa adensada energeticamente pode ser determinante para sua aplicação como insumo energético.

O briquete é o produto fabricado por meio da secagem e compactação mecânica de vários tipos de resíduos de biomassa, resultando em blocos que podem ser cilíndricos ou poligonais (Silveira e Lopes, 2011). Os briquetes feitos de resíduos de biomassa podem gerar até três vezes mais energia do que a lenha possuindo volume reduzido em comparação com os resíduos originais, além de serem recicláveis, terem o mesmo poder calorífico, uma durabilidade que pode ser até três vezes maior do que a da lenha, e apresentarem um formato homogêneo e dimensões padronizadas, o que simplifica seu transporte e manipulação (Silveira e Lopes, 2011).

O processo de produção dos briquetes é intensivo em energia já que envolve a secagem, trituração/moagem e prensagem da biomassa. Dessa forma, o dimensionamento e/ou escolha da briquetadeira adequada para o adensamento deve ser feito com base em critérios bem definidos como, por exemplo, capacidade de produção, consumo energético e custo do equipamento para que o gasto de energia seja otimizado.

Uma alternativa de adensamento energético da biomassa é a torrefação. Diferente da produção de briquetes, a torrefação remove tanto a umidade quanto compostos voláteis. Essa remoção ocorre

em uma faixa de temperatura de 200°C a 350°C em atmosfera reacional inerte (N₂ de maneira geral) ou parcialmente oxidante (Carneiro-Junior et al., 2021). Assim como o uso da briquetadeira, a torrefação também consome energia para promover o adensamento energético da biomassa, necessitando ser cuidadosamente dimensionado para viabilizar energeticamente sua aplicação em outras cadeias produtivas.

A pirólise e a gaseificação de biomassa são exemplos de processos que são beneficiados com a utilização da biomassa adensada, principalmente através da torrefação. As propriedades físico-químicas da biomassa quando aprimoradas pela torrefação permitem que tanto a pirólise quanto a gaseificação tenham em seus produtos melhores indicadores de desempenho (Wang, Kejie *et al*, 2022).

No caso específico do processo de gaseificação a qualidade do gás de síntese produzido é melhorada quando comparado o uso da biomassa *in natura* e da mesma biomassa torrefeita. Este fato confirma que a aplicação da biomassa adensada, em particular torrefeita, está em crescente ascensão, mesmo com o gasto energético inerente ao processo (Im-Orba e Arpornwichanop, 2021).

A importância de estudos para aprimorar ou desenvolver tecnologias de adensamento energético de biomassa é percebida pelo número crescente de publicações de estudos sobre a temática na literatura, que reforçam os benefícios da aplicação desse insumo.

O presente trabalho tem por objetivo selecionar/indicar, dentre opções disponíveis no mercado, uma briquetadeira de biomassa para estudos energéticos de torrefação e gaseificação em unidade piloto existente na Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia. Para isso, serão aplicados métodos de apoio à tomada de decisão.

Os métodos de apoio à tomada de decisão são aplicados em diversas áreas do conhecimento e se apresentam em grande número na literatura. A depender do número de critérios e alternativas pode-se selecionar o método mais apropriado para modelagem do problema ou combinar métodos para essa finalidade (Menekşe e Camgöz Akdağ, 2023).

Os métodos denominados MCDM (multi criteria decision making) podem ordenar alternativas confrontando critérios que possuem claro e manifesto trade-off, sejam eles quantitativos, qualitativos ou ambos (Patel, Mehta e Sharma, 2023).

Os métodos escolhidos, em função das características do problema, foram o CRITIC-WASPAS, CRITIC-WISP e o AHP-Gaussiano por não necessitar, obrigatoriamente, da avaliação dos critérios por parte dos tomadores de decisão.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta subseção são apresentados os fundamentos teóricos necessários para o desenvolvimento metodológico do presente trabalho.

2.1 MÉTODO AHP-GAUSSIANO

O método AHP-Gaussiano foi desenvolvido a partir do método AHP proposto pelo prof. Saaty (Saaty, 1980), diferenciando-se deste pelo fato de não necessitar da avaliação par-a-par dos critérios por parte dos tomadores de decisão, eliminando o esforço cognitivo desta etapa, bem como a demanda de tempo necessário para essa análise quando o problema apresenta uma quantidade de critérios elevada (Santos, dos e Santos, dos, 2021). Outra vantagem do método AHP-Gaussiano é a possibilidade de analisar problemas com número de critérios superior a quinze (15), limitação existente no método AHP original.

2.2 MÉTODO CRITIC

O método CRITIC tem por objetivo principal ponderar a importância dos critérios em um problema de tomada de decisão multicritérios, através da correlação existente entre eles (Diakoulaki, Mavrotas e Papayannakis, 1995). Por isso, o método CRITIC vem amplamente sendo aplicado conjuntamente com outros métodos multicritérios de apoio à tomada de decisão.

As etapas de aplicação do método CRITIC são:

Construção e normalização da matriz de decisão: A normalização da matriz de decisão diferencia os critérios de custo (Equação (1)) daqueles de benefício (Equação (2)). O sobrescrito “+” indica o maior valor de cada critério, enquanto que o sobrescrito “-” indica o menor valor dentre eles.

$X_{ij} = \frac{r_{ij} - r_i^+}{r_i^- - r_i^+}$	(1)
$X_{ij} = \frac{r_{ij} - r_i^-}{r_i^+ - r_i^-}$	(2)

Calcular o coeficiente de correlação entre os critérios na matriz normalizada: Como resultado desta etapa tem-se uma matriz quadrada, cuja ordem é igual ao número de critérios. Como a correlação linear entre o mesmo critério é igual a um (1), a diagonal principal dessa matriz é facilmente determinada. A Equação (3) ilustra o procedimento de calcula da correlação linear entre os critérios.

$\rho_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)(x_{ik} - \bar{x}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \sum_{i=1}^m (x_{ik} - \bar{x}_k)^2}}$	(3)
--	-----

Calcular o índice C_i para cada critério: A Equação (4) indica como o fator C_i é calculado. O σ_j representa o desvio padrão existente ente os valores do mesmo critério.

$C_j = \sigma_j \cdot \sum_{k=1}^n (1 - \rho_{jk})$	(4)
---	-----

Calcular o peso dos critérios: O peso dos critérios, W_j , é calculado pela média entre os índices C_i , como indicado pela Equação (5).

$W_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j}$	(5)
--------------------------------------	-----

2.3 MÉTODO WASPAS

O método WASPAS para ser aplicado perpassa pelas seguintes etapas (Assis, de, Santos, dos e Basilio, 2023):

Construção e normalização da matriz de decisão: O processo de normalização da matriz de decisão é realizado pela aplicação das equações (6) e (7). O método normaliza de forma diferenciada os critérios de custo (1) e de benefício (2).

$r_{ij} = \frac{\min_i x_{ij}}{x_{ij}}$	(6)
$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_i x_{ij}}$	(7)

Atribuição de pesos aos critérios: Nesta etapa os tomadores de decisão devem atribuir pesos (importâncias) para cada critério. Deve-se atentar para que o somatório dos pesos seja igual a um (1) ou 100%.

Calcular os critérios de otimização: Os critérios de otimização do método WASPAS são baseados nos métodos da soma ponderada (WSM), $Q^{(1)}$ e do produto ponderado (WPM) $Q^{(2)}$. As equações (8) e (9) fornecem os valores dos critérios de otimização $Q^{(1)}$ e $Q^{(2)}$.

$Q_i^{(1)} = \sum_{j=1}^n \bar{x}_{ij} w_j$	(8)
$Q_i^{(2)} = \prod_{j=1}^n (\bar{x}_{ij})^{w_j}$	(9)

Determinar a importância relativa de cada alternativa, Q_i : A Equação (10) ilustra o procedimento para determinação da importância relativa de cada alternativa. Nesta equação observava-se o parâmetro λ que assume valores entre 0 e 1. Assim, o método WASPAS permite uma análise de sensibilidade relativa à soma ponderada e ao produto ponderado.

$Q_i = \lambda Q_i^{(1)} + (1 - \lambda) Q_i^{(2)}$	(3)
---	-----

2.4 MÉTODO WISP

O Método WISP tem como base outros métodos de auxílio à tomada de decisão multicritério como, por exemplo, o método WASPAS discutido na seção 2.3. Dessa forma, a utilização de somas ponderadas, produtos ponderados ou exponenciais ponderados está presente na formulação do método (Stanujkic et al., 2023).

As etapas para aplicação do método WISP estão indicadas abaixo:

Construção da matriz de decisão normalizada: A normalização da matriz de decisão é realizada através da Equação (11).

$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_i x_{ij}}$	(11)
---	------

Determinação do valor de quatro (4) medidas de utilidade, como indicado nas Equações 12—15.

$u_i^{wsd} = \sum_{j \in \Omega_{max}} r_{ij} w_j - \sum_{j \in \Omega_{min}} r_{ij} w_j$	(12)
$u_i^{wpd} = \prod_{j \in \Omega_{max}} r_{ij} w_j - \prod_{j \in \Omega_{min}} r_{ij} w_j$	(13)
$u_i^{wsr} = \frac{\sum_{j \in \Omega_{max}} r_{ij} w_j}{\sum_{j \in \Omega_{min}} r_{ij} w_j}$	(14)

$$u_i^{wpr} = \frac{\prod_{j \in \Omega_{max}} r_{ij} W_j}{\prod_{j \in \Omega_{min}} r_{ij} W_j} \quad (15)$$

Onde u_i^{wsd} e u_i^{wpd} representam a diferença entre a influência dos critérios de custo e benefícios, enquanto u_i^{wsr} e u_i^{wpr} representam a influência da razão desses critérios, calculadas com base nos modelos de soma e produto ponderados sobre a utilidade final da alternativa.

Recalcular os valores das quatro utilizadas segundo as Equações 16—19.

$\bar{u}_i^{wsd} = \frac{u_i^{wsd}}{(1 + u_{maxi}^{wsd})}$	(16)
$\bar{u}_i^{wpd} = \frac{u_i^{wpd}}{(1 + u_{maxi}^{wpd})}$	(17)
$\bar{u}_i^{wsr} = \frac{u_i^{wsr}}{(1 + u_{maxi}^{wsr})}$	(18)
$\bar{u}_i^{wpr} = \frac{u_i^{wpr}}{(1 + u_{maxi}^{wpr})}$	(19)

Calcular a utilidade global u_i de cada alternativa, segundo a Equação (20).

$$u_i = \frac{1}{4} (u_i^{wsd} + u_i^{wpd} + u_i^{wsr} + u_i^{wpr}) \quad (20)$$

O método WISP não diferencia entre critério de custo ou benefício no procedimento de normalização da matriz de decisão. O efeito de custo ou benefício dos critérios é contabilizado nas medidas de utilidades (equações 12—15).

A ordenação das alternativas se dá em ordem crescente do valor de u_i , ou seja, a alternativa com maior valor da utilidade global será aquela mais indicada (Stanujkic et al., 2023).

3 METODOLOGIA

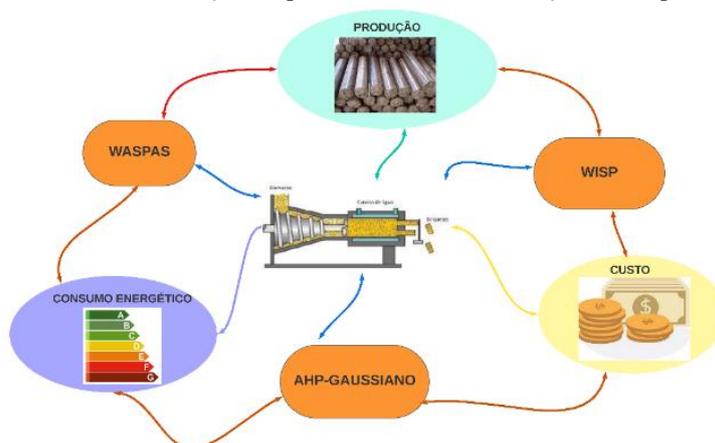
A metodologia desse trabalho perpassa pela definição dos critérios que serão analisados para seleção da briquetadeira de biomassa através aplicação dos métodos de apoio à tomada de decisão:

3.1 ESTRUTURA DO PROBLEMA

O problema de seleção da briquetaria foi feita através de discussões com a equipe do laboratório e levantamento das demandas e restrições dos equipamentos existentes. Nesse sentido, o

mapa mental ilustrado na Figura 1 foi confeccionado, sintetizando o pensamento metodológico do problema central deste trabalho.

Figura 1. Mapa mental de estruturação do problema central de seleção da briquetadeira de biomassa.



Fonte: Autor

3.2 CRITÉRIOS DESEMPENHO E ALTERNATIVAS

Os parâmetros operacionais como, por exemplo, diâmetro e forma do briquete e as dimensões dos equipamentos foram utilizados para selecionar quais equipamentos fariam parte da ordenação (alternativas). Assim, seis (6) modelos de briquetadeiras foram escolhidos para análise e ordenação.

Visando preservar a identidade dos fabricantes, adotou-se neste trabalho como nomenclatura apenas a palavra “modelo X”, onde “X” representa apenas uma numeração de 01 a 06. Os critérios de seleção formam definidos como sendo: produção (t/h), consumo energético (kW) e custo (R\$).

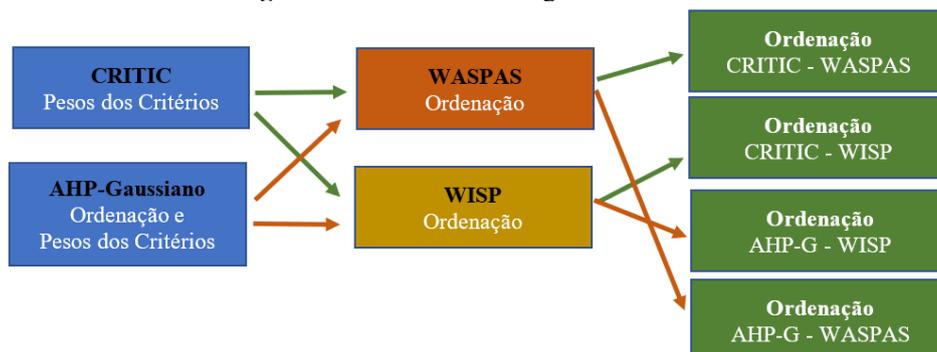
3.3 DEFINIÇÃO DOS PESOS (IMPORTÂNCIA) PARA OS CRITÉRIOS

Os pesos (importância) para os critérios serão estimados através do método CRITIC, descrito na seção 2.2., sendo aplicados nos métodos WASPAS e WISP. Para efeito de comparação, o fator gaussiano normalizado será aplicado com ponderador dos critérios tanto no método WASPAS quanto no método WISP.

3.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS

A ordenação proposta por cada método será discutida tendo como referência os pesos utilizados para ponderar os critérios. Além dos pesos propostos pelo método CRITIC, será utilizado o fator gaussiano normalizado como peso dos critérios nos métodos WASPAS e WISP (Figura 2).

Figura 2. Resumo metodológico do trabalho.



Fonte: Autor

4 RESULTADOS

A matriz de decisão utilizada para modelagem do problema está representada na Tabela 1. A partir dos dados informados na matriz de decisão, os métodos AHP-Gaussiano, CRITIC-WASPAS e CRITIC-WISP foram aplicados para ordenação das alternativas (modelos de briquetadeiras).

Tabela 1. Matriz de decisão: modelos de briquetadeiras e critérios de seleção.

Modelos/Critérios	Produção (t/h)	Consumo (kW)	Custo (R\$)
Modelo 01	3,50	5,50	9600,00
Modelo 02	7,00	7,50	11523,25
Modelo 03	9,00	11,00	12487,32
Modelo 04	2,00	8,50	10548,35
Modelo 05	3,00	10,00	15658,12
Modelo 06	5,00	17,00	16587,22

Fonte: Autor

O método WASPAS foi aplicado sobre a mesma matriz de decisão (Tabela 1) para fins de comparação da ordenação das alternativas analisadas. Relembrando que o método WASPAS necessita que o tomador de decisão atribua pesos (importância) para os critérios que devem ser levados em consideração na seleção do melhor equipamento (alternativa). Assim, para eliminar a subjetividade na escolha desses pesos, escolheu-se o método CRITIC para que estes valores fossem atribuídos com base na correlação entre os valores de cada critério, como mostrado na Tabela 2.

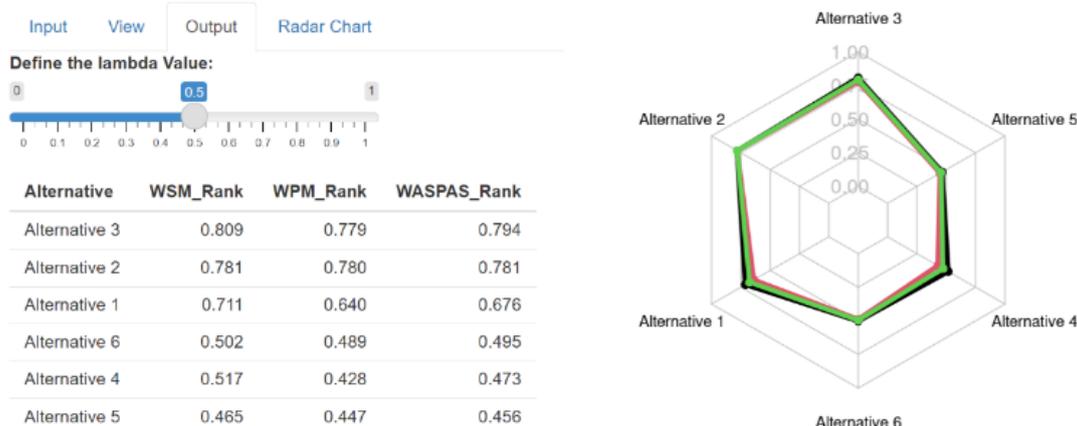
Tabela 2. Pesos atribuídos através do método CRITIC.

Critérios	Pesos (%)
Produção (t/h)	47,24
Consumo (kW)	25,80
Custo (R\$)	26,96

Fonte: Autor

A Figura (3) ilustra a ferramenta computacional desenvolvida por Barbara e Santos (2023) com o intuito de facilitar a aplicação do método WASPAS.

Figura 3. Ferramenta computacional para aplicação do método WASPAS.



Fonte: adaptado de BARBARA e SANTOS (2023).

A ordenação realizada pelo método WASPAS, utilizando os pesos sugeridos pelo método CRITIC, recomenda o modelo 3, seguido dos modelos 2 e 1. Observa-se que existe uma proximidade entre os modelos 3 e 2, justificando um olhar crítico por parte dos tomadores de decisão. Na Figura 3, o parâmetro “ λ ” foi considerado igual a 0,5, ou seja, considerando que as contribuições da soma e produto ponderados são iguais. Mesmo que se altere o valor desse parâmetro para os extremos (0 e 1), a ordenação sugerida não foi alterada.

A Figura 4 ilustra a ordenação realizada através do método WISP, com os pesos sugeridos pelo método CRITIC. Para o método WISP o modelo 02 foi o indicado, seguido dos modelos 03 e 01. Assim, houve uma inversão entre os primeiros e segundos lugares indicados pelos métodos CRITIC-WASPAS e CRITIC-WISP. O terceiro lugar se manteve na indicação dos dois métodos da mesma forma que o modelo que ficou na última posição.

Figura 4. Ordenação dos modelos através do método WISP.

MÉTODO WISP										
UTILIDADES					UTILIDADES NORMALIZADAS					
	ui_wsd	ui_wsp	ui_wsr	ui_wpr		ui_wsd	ui_wsp	ui_wsr	ui_wpr	ui
Modelo 1	-0,056	0,171	0,767	14,104	Modelo 1	-0,0506	0,1187	0,3368	0,7735	0,2946
Modelo 2	0,066	0,346	1,220	17,233	Modelo 2	0,0601	0,2406	0,5358	0,9452	0,4454
Modelo 3	0,102	0,438	1,277	13,940	Modelo 3	0,0929	0,3048	0,5608	0,7646	0,4308
Modelo 4	-0,195	0,083	0,349	4,746	Modelo 4	-0,1773	0,0576	0,1534	0,2603	0,0735
Modelo 5	-0,249	0,119	0,388	4,076	Modelo 5	-0,2257	0,0826	0,1702	0,2236	0,0627
Modelo 6	-0,265	0,193	0,497	3,773	Modelo 6	-0,2405	0,1341	0,2184	0,2069	0,0797
Máximo	0,102	0,438	1,277	17,233	Modelo Indicado:					0,4454
					Pior Modelo:					0,0627

Fonte: Autor

A ferramenta computacional ilustrada na Figura (5) permite resolver as equações do método AHP-Gaussiano com agilidade. Assim, o tomador de decisão não necessita conhecer a modelagem

matemática do método, dedicando-se prioritariamente na análise dos resultados e consequente seleção do modelo mais adequado.

Figura 5. Ferramenta para aplicação do método AHP-Gaussiano.

AHP - GAUSSIANO

Número de Alternativas: 6
Número de Critérios: 3

Limpar Tudo

GERAR BASE AHP-Gaussiano
GERAR BASE AHP-Gaussiano + AHP
PROCESSAR AHP-Gaussiano
PROCESSAR AHP-Gaussiano + AHP

Tipo	MAX	MIN	MIN
	Produção	Consumo	Custo
Modelo 01	3,50	5,50	9600,00
Modelo 02	7,00	7,50	11523,25
Modelo 03	9,00	11,00	12487,32
Modelo 04	2,00	8,50	10548,35
Modelo 05	3,00	10,00	15658,12
Modelo 06	5,00	17,00	16587,22

	Produção	Consumo	Custo	AHP-G	RANK
Modelo 01	0,1186441	0,2663881	0,2125926	0,1849545	3
Modelo 02	0,2372881	0,1953513	0,1771105	0,2121508	2
Modelo 03	0,3050847	0,1331194	0,1634369	0,2218413	1
Modelo 04	0,0677966	0,1723688	0,1934795	0,1258848	5
Modelo 05	0,1016949	0,1465134	0,1303406	0,1218379	6
Modelo 06	0,1694915	0,0861844	0,1230399	0,1333308	4

Média	0,1666667	0,1666667	0,1666667
Desvio Padrão	0,089953	0,0613248	0,0351298
Fator Gaussiano	0,5397181	0,3679487	0,2107786
Fator G. Norma.	0,4825609	0,3289823	0,1884568

Início **AHP-GAUSSIANO** AHP-GAUSSIANO Formulas

Fonte: MOREIRA (2021).

Pela ordenação realizada através do método AHP-Gaussiano o modelo 03 é a melhor alternativa com 22,18%, aproximadamente, seguida dos modelos 02 (21,22%) e modelo 01 (18,50%). Como observado nos outros métodos aplicados existe uma proximidade entre os dois modelos melhor ranqueados.

A Tabela 3 apresenta as ordenações realizadas pelos métodos aplicados.

Tabela 3. Ordenação das alternativas pelos métodos propostos.

Modelos/Método	CRITIC-WASPAS	CRITIC-WISP	AHP-GAUSSIANO
Modelo 01	3	3	3
Modelo 02	2	1	2
Modelo 03	1	2	1
Modelo 04	6	6	5
Modelo 05	4	4	6
Modelo 06	5	5	4

Fonte: Autor

Os métodos divergem parcialmente no posicionamento dos últimos modelos ordenados, mas por estes estarem numericamente distantes dos primeiros colocados não apresentam qualquer influência no julgamento dos tomadores de decisão na escolha das melhores opções de equipamento.

O fator gaussiano normalizado foi utilizado como peso dos critérios nos métodos WASPAS e WISP afim de se verificar a variabilidade na ordenação das alternativas.

A Tabela 4 resume os resultados obtidos na simulação realizada. Observa-se que na essência as ordenações foram mantidas, o que reforça a robustez dos métodos empregados.

Entretanto, diferentemente da situação na qual o CRITIC foi empregado para geração dos pesos, a ordenação pelo método WASPAS apresentou sensibilidade ao parâmetro “ λ ”. Para valores de $\lambda < 0,28$ os modelos 02 e 03 alternaram de posição. Assim, o modelo 03 pode receber a indicação de melhor opção pelos três (3) métodos utilizados.

Tabela 4. Comparação da ordenação realizada pelos métodos WISP e WASPAS com pesos atribuídos pelo método CRITIC e AHP-Gaussiano.

Modelos/Método	CRITIC-WASPAS	AHP-G-WASPAS	CRITIC-WISP	AHP-G-WISP
Modelo 01	3	3	3	3
Modelo 02	2	1 ($\lambda < 0,28$) / 2 ($\lambda > 0,28$)	1	1
Modelo 03	1	1 ($\lambda > 0,28$) / 2 ($\lambda < 0,28$)	2	2
Modelo 04	6	6	6	6
Modelo 05	4	4	4	6
Modelo 06	5	5	5	5

Fonte: Autor.

5 CONCLUSÃO

Foi possível ordenar os modelos de briquetadeiras identificados no mercado através dos métodos AH-Gaussiano, CRITIC-WASPAS e CRITIC-WISP. Sendo modelo 03 o mais indicado quando analisadas as proposições dos métodos aplicados.

O modelo 02 de briquetadeira merece atenção na análise, já que foi indicada como melhor opção pelo método CRITIC-WISP e pelo método AHP-G – WASPAS quando o parâmetro $\lambda < 0,28$. Mesmo quando indicado como segunda opção, o modelo 02 apresenta proximidade numérica relativa ao modelo 03.

Foi possível perceber com a análise realizada e sumarizada na Tabela 4 que o método AHP-Gaussiano pode ser empregado também para sugerir a ponderação entre os critérios e com isso ser utilizado de forma híbrida com outros métodos de apoio a tomada de decisão.

Para consolidar a aplicação do método AHP-Gaussiano como propositor de ponderações de critérios em aplicações híbridas, sugere-se que os cenários propostos nesse trabalho sejam analisados por outros métodos de apoio à tomada de decisão como, por exemplo, o MOORA, TOPSIS, dentre outros.

Com o equipamento selecionado pode-se então condicionar a biomassa in natura disponível para atender as especificações dos processos de torrefação e gaseificação, no que tange ao diâmetro médio e umidade das partículas briquetadas.

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Energia e Gás – LEN por disponibilizar a infraestrutura necessária para o desenvolvimento desse trabalho.

REFERÊNCIAS

- ASSIS, G. S. DE; SANTOS, M. DOS; BASILIO, M. P. Use of the WASPAS Method to Select Suitable Helicopters for Aerial Activity Carried Out by the Military Police of the State of Rio de Janeiro. **Axioms**, v. 12, n. 1, p. 77, 12 jan. 2023.
- CARNEIRO-JUNIOR, J. A. M.; OLIVEIRA, G. F. DE; ALVES, C. T.; ANDRADE, H. M. C.; MELO, S. A. DE; TORRES, E. A. Valorization of prosopis juliflora woody biomass in northeast brazilian through dry torrefaction. **Energies**, v. 14, n. 12, 2021.
- DIAKOULAKI, D.; MAVROTAS, G.; PAPAYANNAKIS, L. Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method. **Computers & Operations Research**, v. 22, n. 7, p. 763–770, ago. 1995.
- IM-ORBA, Karittha; ARPORNWICHANOP, Amornchai. Process analysis of an integrated gasification and methanol synthesis process for bio-methanol production from untreated and torrefied biomass. **Chemical Engineering Transactions**. V. 86, 2021.
- MENEKŞE, A.; CAMGÖZ AKDAĞ, H. Medical waste disposal planning for healthcare units using spherical fuzzy CRITIC-WASPAS. **Applied Soft Computing**, v. 144, p. 110480, set. 2023.
- PATEL, P.; MEHTA, D.; SHARMA, N. Assigning the Weights to DRASTIC-L Model Parameters Using AHP Technique. **Water Conservation Science and Engineering**, v. 8, n. 1, p. 23, 12 dez. 2023.
- PRAKASH KUMAR, B. G.; FRANCIS, R. R.; RAOUF, A.; SUBRAMANIAN, R.; GUPTA, S.; KANNAN, G.; THIRUMAVALAVAN, K. Torrefied materials derived from waste vegetable biomass. **Materials Today: Proceedings**, v. 28, p. 852–855, 2019.
- RAJ, R.; TIRKEY, J. V.; JENA, P. Gasification of Briquette, Mahua wood, and Coconut shell and application to CI engines: Comparative performance and optimisation analysis. **Industrial Crops and Products**, v. 199, p. 116758, set. 2023.
- SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation**. [s.l.] McGraw-Hill International Book Company, 1980.
- SANTOS, F. B. DOS; SANTOS, M. DOS. **Choice of armored vehicles on wheels for the Brazilian Marine Corps using ProPPAGA** Procedia Computer Science. **Anais...2021** Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85124939605&doi=10.1016%2Fj.procs.2022.01.037&partnerID=40&md5=217ff942b034ab7709721a2e4b91c683>>
- SANTOS, M. DOS; COSTA, I. P. DE A.; GOMES, C. F. S. MULTICRITERIA DECISION-MAKING IN THE SELECTION OF WARSHIPS: A NEW APPROACH TO THE AHP METHOD. **International Journal of the Analytic Hierarchy Process**, v. 13, n. 1, 19 maio 2021.
- SILVEIRA, L. A. P.; LOPES, M. D. CARVALHO. Análise da viabilidade econômica para a implantação de uma industria de briquetes de residuos de madeira. XX Congresso de Iniciação Científica, CIC 2011
- STANUJKIC, D.; POPOVIC, G.; KARABASEVIC, D.; MEIDUTE-KAVALIAUSKIENE, I.; ULUTAŞ, A. An Integrated Simple Weighted Sum Product Method—WISP. **IEEE Transactions on**

Engineering Management, v. 70, n. 5, p. 1933–1944, maio 2023.

WANG, Kejie; KONG, Ge; ZHANG Guanyu; ZHANG Xin; HAN Lujia; ZHANG Xuesong. Steam Gasification of Torrefied/Carbonized Wheat Straw for H₂-Enriched Syngas Production and Tar Reduction. **International Journal of Environmental Research and Public Health**. 19(17), 10475. <https://doi.org/10.3390/ijerph191710475>.

YANG, Y.; ZHAO, J.; ZHANG, M.; WANG, D. Utilizing hydrolysis residue from bioethanol production as an additive for solid fuel pellets. **Fuel**, v. 348, p. 128582, set. 2023.