


RANQUEAMENTO DE FOGÕES À LENHA DE TECNOLOGIA APRIMORADA POR MEIO DO MÉTODO ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP) DA PESQUISA OPERACIONAL

 <https://doi.org/10.56238/arev6n4-440>

Data de submissão: 27/11/2024

Data de publicação: 27/12/2024

Gilmara de Oliveira Machado

Professora do curso de Engenharia Florestal, Tecnologia da Madeira.
Doutora em Ciências e Engenharia de Materiais.
Universidade Estadual do Centro-Oeste.
Irati, Paraná, Brasil.
E-mail: gmachado@unicentro.br
Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1455-9086>
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8437491371699720>

Milena Maria Van Der Neut de Almeida

Mestre em Bioenergia
Universidade Estadual do Centro-Oeste.
Irati, Paraná, Brasil.
E-mail: milena_vdn@hotmail.com
Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-5223-4655>
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9197589168163201>

Amanda Augusta Fernandes

Doutoranda em Ciências.
Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.
Universidade de São Paulo. Piracicaba, São Paulo, Brasil.
E-mail: aafer18@gmail.com
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3738-1738>
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7253432884344960>

RESUMO

A busca por soluções energéticas sustentáveis é essencial para comunidades que ainda dependem de fogões à lenha. A escolha acertiva de fogões de tecnologia melhorada e combustíveis renováveis continua sendo um desafio, devido ao impacto ambiental do consumo de lenha e das emissões associadas. Apesar de estudos sobre a eficiência de fogões à lenha, há uma lacuna na aplicação de metodologias multicritério robustas e automatizadas para comparar simultaneamente a eficiência dos fogões, consumo de lenha e potência calorífica. Este estudo usa o método Analytic Hierarchy Process (AHP) para ordenar e ranquear fogões à lenha de *Eucalyptus grandis* com base nos critérios de eficiência, potência e consumo de lenha. A implementação automatizada via scripts no software R permitiu análises gráficas e comparações detalhadas. Os dados mostraram que o fogão aprimorado com chaminé alongada (Eficiência, $E_f = 13,05\%$, Consumo de lenha, $F = 0,66$ kg/h, Potência, $P = 0,38$ kW) se destacou como a opção mais eficiente e sustentável, alcançando a maior prioridade no ranqueamento com um peso de 0,44. O fogão aprimorado com chaminé curta ($E_f = 14,10\%$, $F = 0,97$ kg/h, $P = 0,60$ kW) ficou em segundo lugar, com um peso de 0,40, enquanto o fogão tradicional ($E_f = 0,86\%$, $F = 2,64$ kg/h, $P = 0,10$ kW) apresentou a menor prioridade, com um peso de 0,17. Conclui-se

que a adoção de tecnologias avançadas, aliada ao uso de combustível renovável, pode reduzir significativamente o consumo de lenha e mitigar o impacto ambiental.

Palavras-chave: Biomassa Renovável. Tecnologia Limpa. Análise Multicritério. Tomada de Decisão.

1 INTRODUÇÃO

A tomada de decisão constitui um aspecto central na gestão pessoal, profissional e corporativa, especialmente em setores que demandam soluções eficientes e sustentáveis. No âmbito da Engenharia florestal e Ambiental, a escolha de alternativas que melhor atendam às necessidades dos usuários, como no caso do uso de fogões à lenha, exige abordagens metodológicas robustas. Uma das ferramentas amplamente utilizadas nesse contexto são os métodos multicritérios de tomada de decisão, com destaque para o *Analytic Hierarchy Process* (AHP), uma técnica de natureza cardinal que combina ciência e sistematização, para obter melhores resultados em processos decisórios complexos.

O método cardinal AHP foi desenvolvido em 1977 pelo Prof. Thomas Saaty (1977) da Escola Wharton da Universidade da Pensilvânia (Saaty, 2008), baseando-se em uma teoria de modelagem que permite a utilização de métodos qualitativos e quantitativos com ricas aplicações na teoria da decisão, resolução de conflitos e modelos de tomada de decisão (Santos et al., 2021). Esse método é usado para analisar problemas, construindo hierarquias e atribuindo pesos a múltiplos critérios, enquanto realiza comparações intuitivas e consistentes aos pares usando escalas predefinidas (Saaty, 2008). O método AHP baseia-se no princípio de que, para tomar decisões, a experiência e o conhecimento dos pesquisadores são, no mínimo, tão valiosos quanto os dados utilizados. O método AHP é um método para auxiliar na tomada de decisões complexas. Mais do que determinar qual a decisão correta, o AHP ajuda os pesquisadores a escolher e a justificar a sua escolha (Lira et al., 2022; Saaty, 2008; Santos et al., 2021).

No que se refere a aplicação do método AHP no contexto de uso energético para coquição de alimentos, importante informar que a eficiência dos fogões à lenha pode variar entre 5% e 30%, dependendo da capacidade de conversão da energia da lenha em calor, da tecnologia empregada e do tipo de construção do fogão (Lau et al., 2013). No entanto, essa eficiência pode ser aumentada com o uso de materiais isolantes adequados na câmara de combustão, como lã de vidro e lã de rocha, que são amplamente utilizados devido ao seu excelente desempenho na retenção de calor (Sutar et al., 2015; Urmee & Gyamfi, 2014; Yunusa et al., 2023). A principal vantagem ambiental do aumento da eficiência desses fogões está na redução significativa do consumo de lenha. Ao diminuir a quantidade de combustível necessário para gerar a mesma quantidade de calor, contribui-se para a preservação de recursos florestais e, conseqüentemente, para a mitigação dos impactos ambientais associados ao desmatamento (Mehetre et al., 2017).

Em relação ao combustível utilizado no fogão à lenha, fontes renováveis se tornam imprescindíveis para diminuir a pressão nas florestas nativas, desta forma, os gêneros *Eucalyptus*, provenientes de florestas plantadas, são empregados para fins energéticos no Brasil, sendo

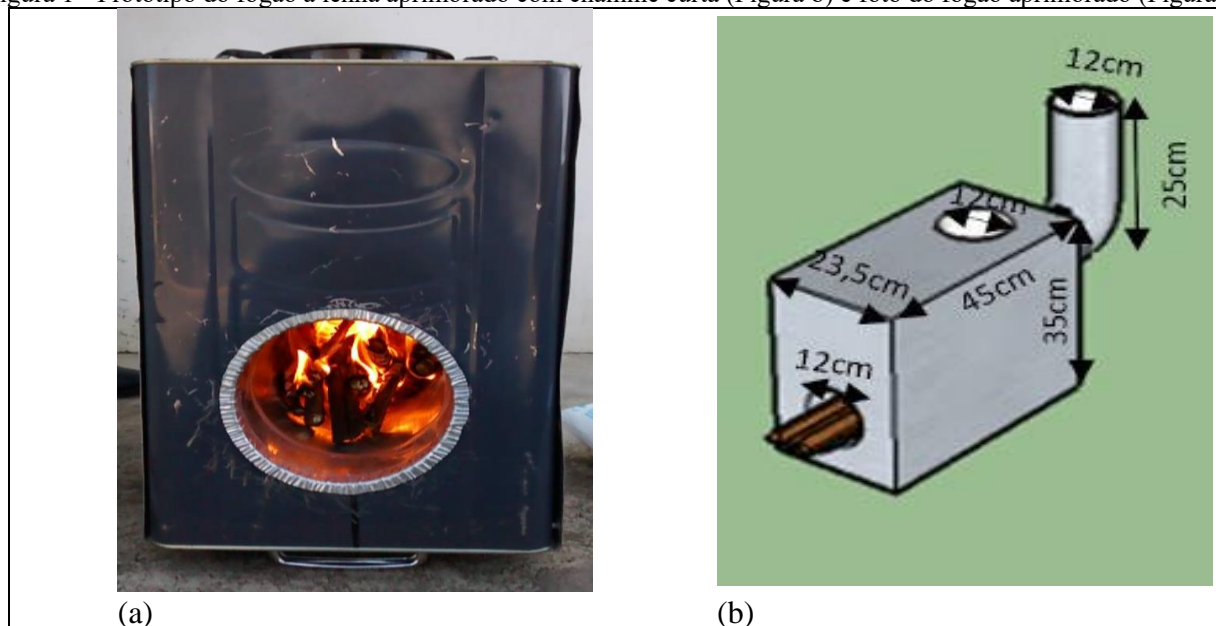
considerados fontes renováveis. Essas espécies se destacam pelo crescimento rápido em comparação com espécies nativas, permitindo mais ciclos de corte em um mesmo período e maior produção de biomassa (Pena-Vergara et al., 2022). Adicionalmente, os gêneros *Eucalyptus* são conhecidos por sua grande variabilidade genética, ocupando cerca de 10,2 milhões de hectares de áreas de árvores plantadas no Brasil, com um crescimento médio estimado de 33,7 m³/ha.ano (IBÁ, 2024).

Este estudo propõe o uso do método multicritério de tomada de decisão *Analytic Hierarchy Process* (AHP), para ordenação e ranqueamento de diferentes tipos de fogão à lenha portátil de tecnologia aprimorada, com base em critérios como eficiência, potência e consumo de combustível.

2 METODOLOGIA

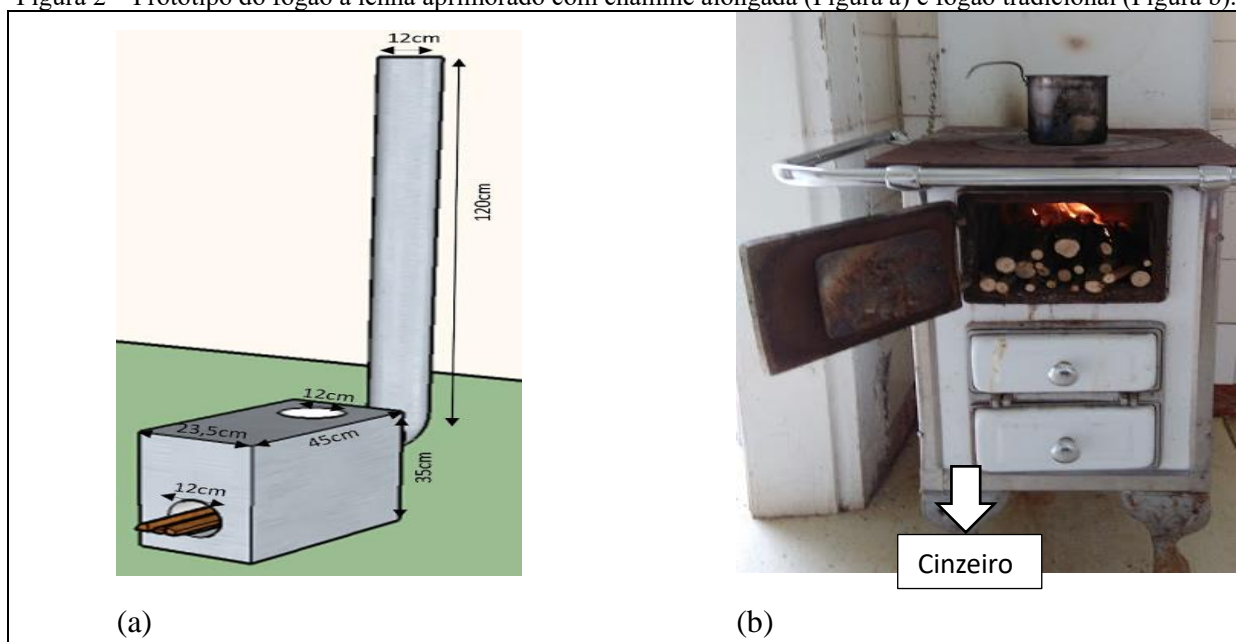
Para o desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados três fogões à lenha: 1) Fogão à lenha aprimorado com pequena chaminé; 2) Fogão à lenha aprimorado com chaminé alongada e; 3) Fogão à lenha tradicional, Fig. 1 a 3. Os fogões 1 e 2 foram construídos com dois recipientes metálicos de forma prismática com faces retangulares, com capacidade de 18 litros cada e câmara de combustão interna de zinco na forma de “L”. A câmara de combustão foi isolada termicamente com argamassa refratária de sílica, sendo moldada e curada sob aquecimento por 24 horas, em um forno à lenha construído no interior do solo. Uma chaminé foi acoplada ao fogão para a canalização dos voláteis, tendo 25 cm de altura e 12 cm de diâmetro. Posteriormente, com o intuito de realizar uma comparação com o fogão tradicional, no fogão 2 alongou-se a chaminé para 1,20 m de altura. Já o fogão tradicional (fogão 3) foi fabricado com ferro fundido, com 48 cm de altura e 41 cm de diâmetro, com chaminé acoplada de aproximadamente 4 metros de altura e 12 cm de diâmetro. O fogão tradicional tinha capacidade para apenas uma panela, não possuindo isolamento térmico da câmara de combustão e se localizava no interior de uma cozinha residencial (Almeida & Machado, 2017).

Figura 1 - Protótipo do fogão à lenha aprimorado com chaminé curta (Figura b) e foto do fogão aprimorado (Figura a).



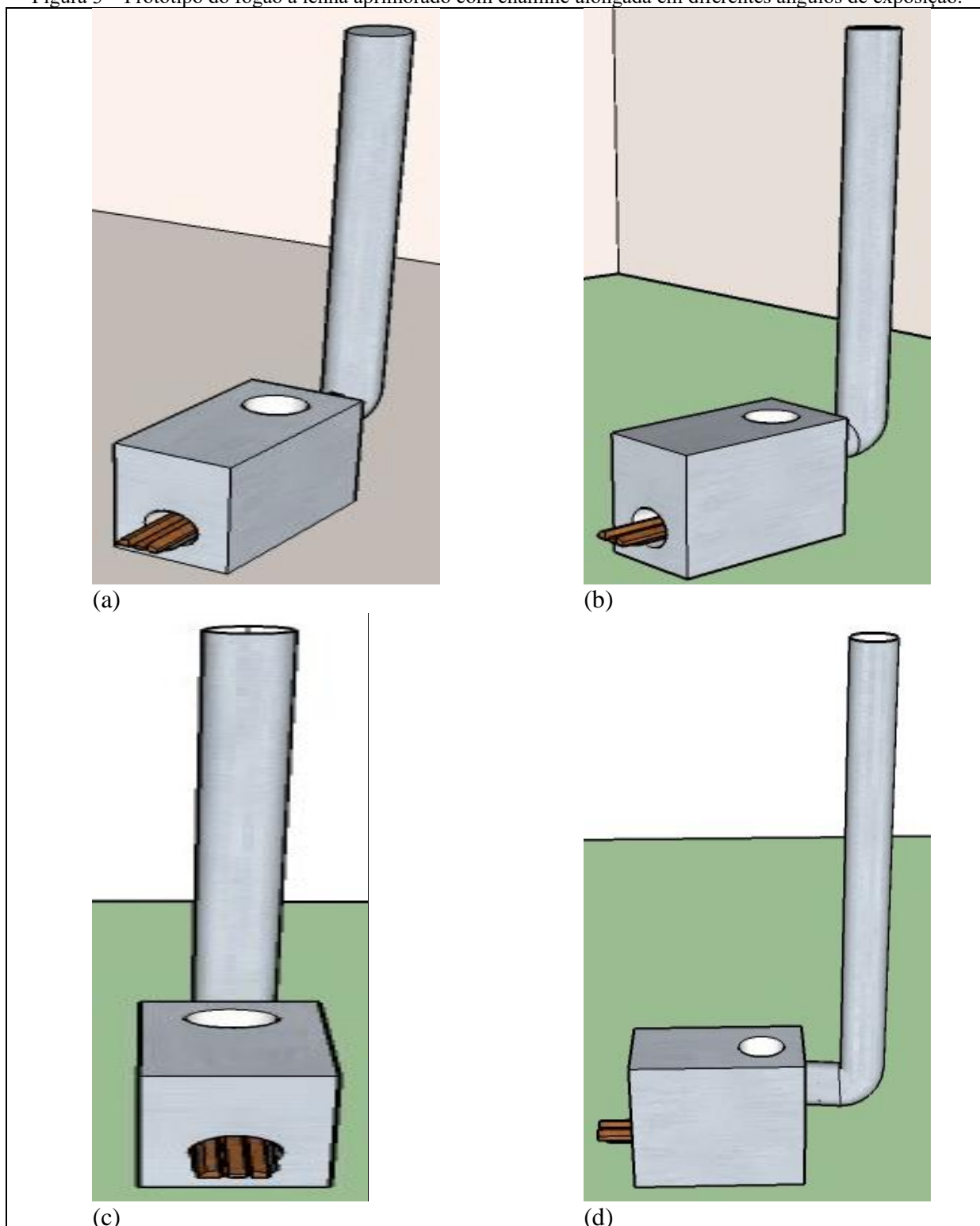
Fonte: Evandro Teleginski, 2017 (Figura b).

Figura 2 – Protótipo do fogão à lenha aprimorado com chaminé alongada (Figura a) e fogão tradicional (Figura b).



Fonte: Evandro Teleginski, 2017 (Figura a).

Figura 3 – Protótipo do fogão à lenha aprimorado com chaminé alongada em diferentes ângulos de exposição.



Fonte: Evandro Teleginski, 2017.

Como combustível foi utilizado galhos de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden com diâmetro na faixa de 0,6 a 3,9 cm e 30 cm de comprimento. A lenha utilizada foi obtida da área experimental

do projeto TUME (Teste de Uso Múltiplo de Eucaliptos), localizada no Centro Estadual Florestal de Educação Profissional Presidente Costa e Silva, na cidade de Irati, Estado do Paraná.

Os critérios utilizados para a escolha do fogão à lenha foram: eficiência, consumo de lenha e potência. A eficiência é o resultado da razão entre o calor absorvido na cocção de alimento (calor útil) e a energia liberada na queima da lenha. A eficiência é expressa em porcentagem sendo que quanto maior o seu valor melhor é o funcionamento do fogão. O cálculo da eficiência foi realizado conforme Lau et al. (2013). O consumo de lenha foi calculado pela razão da quantidade de lenha utilizada e o tempo necessário para aquecer a água e fervê-la por 15 minutos, sendo expresso em kilograma por hora. Quanto menor o consumo de lenha pelo fogão, melhor é o resultado. O cálculo do consumo de lenha foi realizado conforme Lupepsa & Machado, 2019. A potência foi definida pela quantidade de energia térmica útil, proveniente da queima da lenha, utilizada no aquecimento e fervura da água pelo tempo transcorrido no experimento. A potência é expressa em Quilowatt sendo que quanto menor o seu valor melhor é o resultado por indicar uma cocção mais branda. O cálculo de potência foi realizado conforme metodologia Lau et al. (2013).

Na comparação do fogão aprimorado e fogão tradicional, foi realizado o teste Tukey de comparação de médias precedido pela significância da Análise de Variância (ANOVA) a 5% de probabilidade de erro.

Adicionalmente, todos os cálculos e gráficos foram realizados por meio do uso do software R que representa uma inovação metodológica, permitindo uma análise transparente e replicável, ao mesmo tempo que democratiza o acesso aos resultados. O software R facilita a aplicação dos métodos propostos de maneira ampla e transparente, permitindo a disseminação dos resultados de forma acessível e colaborativa. Ao integrar esses métodos no R, a pesquisa amplia seu alcance, oferecendo aos usuários de fogões à lenha uma linguagem de programação prática e de código aberto (TEAM, 2021).

Para ranqueamento e seleção dos fogões à lenha foi aplicado o método AHP. O método AHP é um método de análise que busca refletir a forma natural de decisão da mente humana, sendo aplicado na resolução de problemas de decisão que envolve múltiplos critérios, construindo hierarquias e atribuindo pesos aos critérios, enquanto realiza comparações intuitivas e consistentes aos pares usando escalas predefinidas (Saaty, 2008). O método AHP baseia-se no princípio de que, para tomar decisões, a experiência e o conhecimento das pessoas são, no mínimo, tão valiosos quanto os dados utilizados. O método AHP é um método para auxiliar às pessoas na tomada de decisões complexas. Mais do que determinar qual a decisão correta, o AHP ajuda as pessoas a ordenar e a justificar a sua escolha (Santos et al., 2021).

O método AHP divide o problema em níveis hierárquicos, facilitando sua compreensão e avaliação. Em cada nível da hierarquia são feitas comparações par a par dos elementos qualitativos do mesmo nível, com base na importância ou contribuição de cada um deles para o elemento do nível superior ao qual estão ligados. No primeiro nível encontra-se o objetivo da decisão, no segundo nível elenca-se os critérios, no terceiro nível os subcritérios caso ocorram e por fim, no último nível, nível 4, as alternativas. Nas comparações par a par, os critérios serão conectados com o objetivo, os subcritérios serão comparados, par a par, com seus respectivos critérios e as alternativas serão comparadas par a par com os subcritérios se existirem ou diretamente aos critérios. Desta forma, a hierarquia do método AHP é do tipo *top down* e tem por objetivo principal calcular as prioridades finais das alternativas considerando todos os critérios e subcritérios da estrutura em rede. A ideia principal desse método é decompor o problema de decisão em uma hierarquia completa o suficiente para representar o problema em análise que é constituído pelos objetivos, critérios e alternativas, facilitando assim sua compreensão e avaliação (Saaty, 2008). O método AHP é constituído por 4 axiomas básicos (Tabela 1).

Tabela 1 – Axiomas do método AHP.

Comparações resíprocas	Os elementos comparados par a par pelo decisor devem satisfazer a condição de reciprocidade, ou seja, se A é três vezes mais preferível que B, então B será um terço mais preferível que A.
Homogeneidade	Os elementos da hierarquia devem ser comparáveis dentro de seu nível, sendo critério com critério, alternativa com alternativa e subcritério com subcritério.
Independência	Quando as preferências são expressas, assume-se que os critérios são independentes das propriedades das alternativas.
Exaustividade	Assume-se que a estrutura hierárquica do problema de decisão tem que ser completa o suficiente para representar o problema.

As comparações par a par realizadas pelo decisor resultam em uma matriz de decisão quadrada, na qual os critérios são comparados entre si em função do objetivo. Da mesma forma, os subcritérios são avaliados de forma comparativa em relação ao critério correspondente, e as alternativas são comparadas entre si à luz dos critérios ou subcritérios, quando aplicável. Esse processo de comparação par a par é conduzido em cada nível da hierarquia decisória, assegurando uma avaliação criteriosa em todas as etapas da análise. A quantidade de julgamentos necessários para a construção de uma matriz de comparação par a par é dada na Equação 1, sendo n a ordem da matriz quadrada (Saaty, 2008).

$$Julgamentos = \frac{n(n-1)}{2} \quad \text{Eq. 1}$$

O método AHP emprega a escala fundamental de Saaty, conforme apresentado na Tabela 2, para realizar comparações par a par entre critérios e alternativas de natureza qualitativa. A construção da matriz de decisão segue duas regras fundamentais: a primeira assegura o cumprimento do axioma da reciprocidade (Regra 1) durante o processo de comparação, enquanto a segunda estabelece que todo elemento comparado a si mesmo, seja critério ou alternativa, deve receber o valor 1 na escala de Saaty (Regra 2), conforme ilustrado na Equação 2. Essas regras garantem que a matriz de comparação par a par é uma matriz quadrada, com os valores da diagonal principal igual a um, recíproca e positiva (Saaty, 2008).

Tabela 2 – Escala fundamental de Saaty.

1	Igual importância	Critério comparado com ele mesmo.
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o juízo favorecem um critério em relação à outro.
5	Importância grande ou essencial	A experiência ou juízo favorece fortemente um critério em relação a outro.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Um critério é muito fortemente favorecido em relação a outro. Pode ser demonstrado na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece um critério em relação a outro, com o mais alto grau de segurança.
2, 4, 6 e 8	Valores Intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad \text{Regra 1} \quad a_{ii} = 1 \quad \text{Regra 2} \quad \text{Eq. 2}$$

No método AHP, as prioridades são determinadas por meio da normalização das matrizes de decisão. Esse procedimento visa unificar os critérios em uma mesma escala, permitindo comparações consistentes. Para isso, cada valor da matriz é dividido pelo somatório de sua respectiva coluna,

conforme demonstrado na Equação 3. Esse processo assegura que todos os critérios sejam avaliados de maneira proporcional e padronizada (Saaty, 2008).

$$\frac{x_{ij}}{\sum_{i=0}^m x_{ij}} \quad \text{Eq. 3}$$

Após a normalização da matriz de decisão, o vetor de prioridades é calculado com o objetivo de determinar a ordem de importância relativa, também chamado peso, de cada critério. Esse vetor é obtido pela média aritmética dos valores presentes em cada linha da matriz normalizada, proporcionando uma medida consolidada da relevância de cada critério no processo decisório (Saaty, 2008).

É fundamental verificar a consistência na aplicação do método AHP, assegurando que os julgamentos realizados nas comparações par a par sejam coerentes. A consistência reflete a racionalidade do decisor, pressupondo que, se o critério A é preferido em relação ao critério B, e B é preferido a C, então A também deve ser preferido a C. Matematicamente, uma matriz de comparação par a par é considerada consistente se a Equação 4 for satisfeita para todos os índices i, j e k (Saaty, 2008).

$$a_{ij} \times a_{jk} = a_{ik} \quad \text{Eq. 4}$$

Observa-se que é raro que todas as matrizes de comparação no método AHP sejam completamente consistentes. Dado que sua construção se baseia em julgamentos humanos, um certo grau de inconsistência é esperado e aceitável. Para lidar com essa questão, Saaty desenvolveu um índice quantitativo que avalia a consistência da matriz de comparação, denominado razão de consistência (RC). Esse índice é calculado pela razão entre o índice de consistência (IC) e o índice randômico (IR) tabelado, conforme a Equação 5 e Tabela 3. Se a razão de consistência for inferior ou igual a 10%, os julgamentos da matriz são considerados consistentes. Caso contrário, identificam-se inconsistências, e o especialista pode ser solicitado a revisar suas avaliações (Saaty, 2008).

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad \text{Eq. 5}$$

$$IC = \frac{\gamma_{max} - n}{n - 1}$$

Tabela 3 - Valores de IR para matrizes quadradas de ordem n

n	IR
1	0,00
2	0,00
3	0,58
4	0,90
5	1,12
6	1,24
7	1,32
8	1,41
9	1,45
10	1,49
11	1,51
12	1,48
13	1,56
14	1,57
15	1,59

Sendo n a ordem da matriz de julgamentos e IR o índice randômico.

Para calcular a razão de consistência (RC) é necessário primeiro obter o maior autovalor (γ_{max}) da matriz de comparação par a par (A), obtido a partir da Equação 6, sendo w o autovetor com os pesos dos critérios. O índice randômico é um número tabelado (Tabela 3) referente ao índice de consistência proveniente de um grande número de comparações par a par efetuadas de maneira aleatória, sendo calculado para matrizes quadradas de ordem n, pelo laboratório nacional de *Oak Ridge* nos Estados Unidos (Saaty, 2008). A Tabela 3 define os valores de IR em função da ordem da matriz (n).

$$A \times w = \gamma_{max} \times w \quad \text{Eq. 6}$$

Se a razão de consistência foi menor ou igual a 10%, calcula-se as prioridades globais das alternativas para se verificar a melhor decisão, por meio de ranqueamento da melhor para a pior. Padroniza-se a matriz de alternativas, somam-se os valores dos critérios em cada alternativa. Calcula-se as médias aritméticas para cada alternativa. Monta-se um vetor contendo essas médias aritméticas. Esse vetor irá apresentar o ranqueamento global das alternativas de acordo com o peso dos critérios avaliados (Saaty, 2008).

Após a verificação da consistência dos julgamentos para os critérios, com um índice de consistência inferior a 10%, procedeu-se ao cálculo das prioridades globais das alternativas. Para tanto, a matriz com os valores numéricos das alternativas foi normalizada, dividindo-se cada elemento da matriz pelo somatório dos elementos da sua respectiva alternativa. Em seguida, calculou-se a média aritmética da matriz normalizada, obtendo-se assim os pesos relativos de cada alternativa. O vetor de

pesos resultante representa o ranking das alternativas, ordenando-as da melhor para a pior, de acordo com os critérios e seus respectivos pesos estabelecidos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O fogão à lenha desta pesquisa tem tecnologia melhorada em relação ao fogão tradicional, apresentando sistema de isolamento térmico da câmara de combustão, o que diminui a perda energética por condução e por convecção na parede metálica (Baldwin, 1987; Sutar et al., 2015; Urmee & Gyamfi, 2014; Yunusa et al., 2023). Adicionalmente, ocorre perda de calor por meio dos gases quentes da chaminé, porém o alongamento da chaminé do fogão aprimorado não conduziu a uma diferença estatística significativa na eficiência e consumo de lenha, o que sugere que o tamanho da chaminé não está diretamente relacionado com essas variáveis, Tabela 4.

Tabela 4 – Comparação entre a eficiência, consumo de lenha e potência do fogão aprimorado em relação ao fogão à lenha tradicional na queima de *Eucalyptus grandis*.

Espécies	Ef (%)	F (kg/h)	P (kW)
FCC	14,10±1,14 a (8,10)	0,97±0,26 b (26,73)	0,60±0,15 a (25,13)
FCA	13,05±0,89 a (6,84)	0,66±0,10 b (15,17)	0,38±0,08 b (20,33)
FTR	0,86±0,12 b (13,59)	2,64±0,26 a (10,00)	0,10±0,01 c (6,85)

Sendo FCC fogão à lenha aprimorado com chaminé Curta, FCA fogão à lenha aprimorado com chaminé alongada e FTR fogão à lenha tradicional. Os símbolos Ef significa eficiência, F consumo de lenha e P a potência calorífica do fogão à lenha. Cada média é seguida pelo respectivo desvio-padrão. O coeficiente de variação encontra-se entre parênteses. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Comparando o fogão aprimorado de chaminé alongada com o fogão tradicional, os resultados demonstram que o fogão à lenha aprimorado apresenta um ganho energético, com um melhor aproveitamento da energia térmica proveniente da queima da lenha (Rasoulkhani et al., 2018). Este melhor aproveitamento energético propicia uma economia no consumo da lenha e um aumento significativo na potência do fogão.

Os resultados obtidos da aplicação do método AHP aos critérios de eficiência, consumo de lenha e potência calorífica estão apresentados na Tabela 5 e Figura 4. A comparação par a par, realizada com base na escala fundamental de Saaty (Saaty, 2008), demonstrou que o critério de eficiência apresentou o maior peso relativo, seguido pelo consumo de lenha, e, por fim, a potência calorífica. A consistência do julgamento foi avaliada por meio da Razão de Consistência, resultando em um valor de 0,007939, que está significativamente abaixo do limite aceitável de 0,10, conforme estabelecido na metodologia AHP. Esse resultado, combinado com o Índice Randômico de 0,58, confirma a consistência interna do modelo utilizado, garantindo a robustez dos pesos atribuídos aos critérios analisados. A hierarquia utilizada na aplicação do método pode ser vista na Figura 4.

Figura 4 – Hierarquia no ranqueamento dos fogões

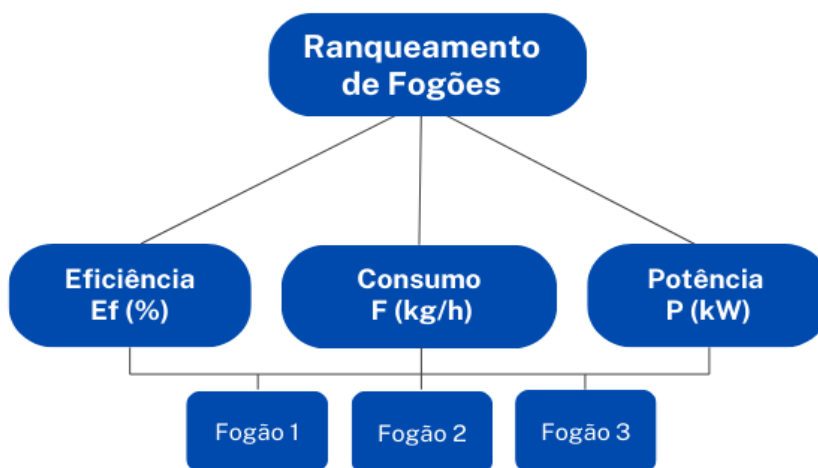
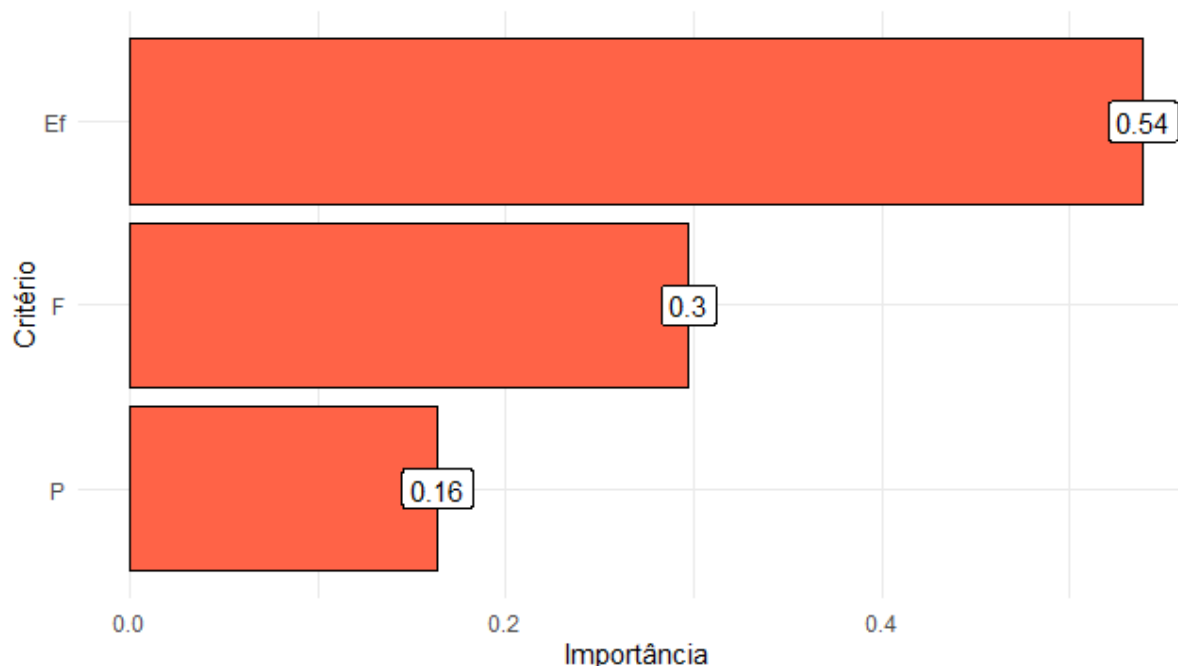


Tabela 5 – Pesos dos critérios determinados por meio da comparação par a par usando a escala fundamental de Saaty pelo método AHP.

Critérios	Ef (%)	F (kg/h)	P (kW)	Pesos
Ef (%)	1	2	3	0,54
F (kg/h)	1/2	1	2	0,30
P (kW)	1/3	1/2	1	0,16

Sendo o Índice Randômico igual a 0,58 e Razão de Consistência de 0,007939. Definimos na comparação par a par, segundo a escala de Saaty.

Figura 5 – Importância dos critérios segundo o método AHP.



A matriz de comparação resultou em pesos que destacam a maior prioridade atribuída à eficiência energética, Figura 5, refletindo a urgência de minimizar o uso de recursos naturais (Ahmad et al., 2022), especialmente lenha proveniente de florestas plantadas, como a de eucaliptos. O consumo de lenha, o segundo critério mais relevante, reforça a necessidade de reduzir a pressão sobre os ecossistemas florestais, preservando a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos que as florestas nativas oferecem (Mehetre et al., 2017). A potência, como critério menos prioritário, ressalta que o foco está na maximização do aproveitamento energético, promovendo fogões mais eficientes que demandem menos lenha, resultando em uma abordagem sustentável e ecológica para a conservação das florestas e a redução da exploração de fontes renováveis de biomassa (Pena-Vergara et al., 2022).

Os resultados apresentados na Tabela 6 e Figura 6 indicam o ranqueamento de diferentes fogões à lenha segundo o método AHP, com base nos critérios de eficiência energética, consumo de lenha e potência. O fogão aprimorado com chaminé alongada obteve a maior prioridade, sendo classificado como a alternativa mais sustentável e eficiente. Esse resultado se deve à sua elevada eficiência energética e baixo consumo de lenha, o que contribui diretamente para a redução da demanda por madeira proveniente de florestas plantadas, promovendo a conservação dos recursos florestais. O fogão aprimorado com chaminé curta ficou em segundo lugar no ranqueamento, mostrando também uma boa eficiência energética e moderado consumo de lenha. Em contraste, o fogão tradicional que é o mais utilizado nas residências, apresentou a menor prioridade devido ao seu

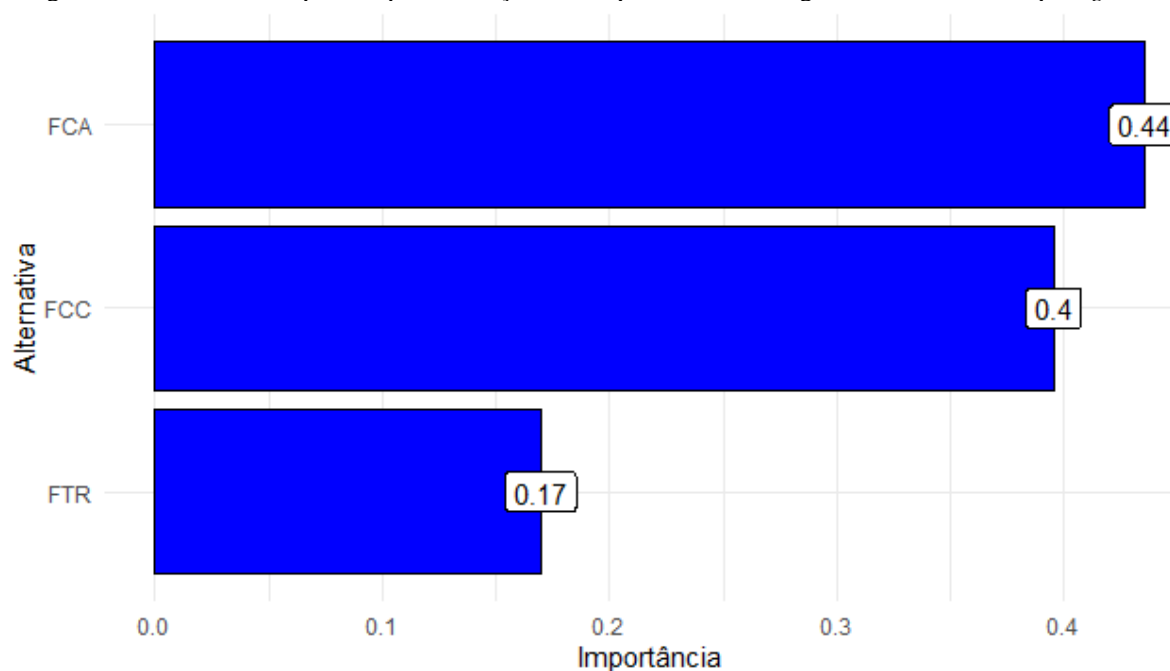
baixo rendimento energético e elevado consumo de lenha, destacando-se como uma alternativa menos favorável do ponto de vista ecológico.

Tabela 6 – Ranqueamento dos fogões à lenha pelo método AHP.

Alternativas	Ef (%)	F (kg/h)	P (kW)	Prioridades	Ranking
FCC	14,10	0,97	0,60	0,40	2°
FCA	13,05	0,66	0,38	0,44	1°
FTR	0,86	2,64	0,10	0,17	3°

Sendo FCC fogão à lenha aprimorado com chaminé curta, FCA Fogão à lenha aprimorado com chaminé alongada e FTR Fogão à lenha tradicional. Os símbolos Ef significa eficiência, F consumo de lenha e P a potência calorífica do fogão à lenha.

Figura 6 – Método AHP aplicado para obtenção do ranqueamento dos fogões à lenha de *Eucalyptos grandis*.



O uso de fogões eficientes como o FCA pode, assim, desempenhar um papel crucial na preservação das florestas, ao reduzir a necessidade de lenha e, conseqüentemente, a pressão sobre ecossistemas florestais, promovendo uma solução mais sustentável para o uso da biomassa.

4 CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo destacam que a introdução de tecnologias aprimoradas em fogões à lenha representa uma solução eficiente e sustentável para o aproveitamento da biomassa florestal. O desempenho superior do fogão aprimorado com chaminé alongada (FCA), evidenciado por sua

elevada eficiência energética e redução no consumo de lenha, reforça sua viabilidade como alternativa para minimizar a pressão sobre florestas plantadas e ecossistemas nativos.

A aplicação do método AHP validou a relevância dos critérios analisados, atribuindo maior prioridade à eficiência energética, o que reflete a necessidade de desenvolver soluções que aliem inovação tecnológica à conservação dos recursos naturais. A adoção de fogões mais eficientes, como o modelo aprimorado avaliado, oferece benefícios diretos para a redução do consumo de lenha, promovendo a preservação da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos.

Ademais, os resultados reforçam a importância de priorizar tecnologias que equilibrem o uso sustentável da biomassa com o aumento da eficiência energética, contribuindo para uma gestão ambiental responsável e para a mitigação dos impactos da exploração florestal. Este estudo, portanto, representa uma contribuição significativa para a engenharia florestal e ambiental, fornecendo subsídios técnicos e científicos para políticas públicas e iniciativas de desenvolvimento sustentável focadas no uso eficiente de recursos energéticos renováveis.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossa sincera gratidão ao Sérgio Vinícius Serejo da Costa Filho por sua inestimável contribuição no desenvolvimento e na programação dos códigos em R que foram fundamentais para a realização deste estudo. Agradecemos também ao Prof. Dr. Marcos dos Santos, pelos valiosos ensinamentos compartilhados no MBA em Pesquisa Operacional e Tomada de Decisão, ministrado pela *Business School Brasil*, os quais enriqueceram significativamente o embasamento teórico desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Ahmad, R., Ilyas, H. N., Li, B., Sultan, M., Amjad, M., Aleem, M., Abbas, A., Imran, M. A., & Riaz, F. (2022). Current challenges and future prospect of biomass cooking and heating stoves in Asian Countries. *Frontiers in Energy Research*, 10, 880064. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.880064>
- Baldwin, S. F. (1987). *Biomass stoves: Engineering design, development, and dissemination*. Volunteers in Technical Assistance [u.a.].
- IBÁ. (2024). IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. <http://www.iba.org/>
- Lira, K. C. S., Francisco, H. R., & Feiden, A. (2022). Classificação de fragilidade ambiental em bacia hidrográfica usando lógica Fuzzy e método AHP. *Sociedade & Natureza*, 34(1). <https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-62872>
- Lupepsa, B., & Machado, G. (2019). FOGÃO À LENHA PORTÁTIL METÁLICO DE TECNOLOGIA MELHORADA PARA MENOR CONSUMO DE LENHA. *Enciclopédia Biosfera*, 16(29), 2337–2343. https://doi.org/10.18677/EnciBio_2019A178
- Almeida, M. V. Der N, & Machado, G. O. M (2017). *Protótipo de um fogão à lenha como alternativa aos modelos tradicionais menos eficientes*. [Dissertação em Bioenergia, Universidade Estadual do Centro-Oeste]. <http://tede.unicentro.br:8080/jspui/bitstream/jspui/1092/2/Disserta%c3%a7%c3%a3o%20Final%20-%20Milena%20Maria%20Van%20Der%20Neut%20de%20Almeida.pdf>
- Mehetre, S. A., Panwar, N. L., Sharma, D., & Kumar, H. (2017). Improved biomass cookstoves for sustainable development: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 672–687. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.150>
- Lau, P. C; Machado, G. O.; Nogueira, L. A. H.; Christoforo, A. L. (2013). Evaluation of the Efficiency Energy of Wood Stove from Irati Brazilian City. *International Journal of Agriculture and Forestry*, 3(7), 267–272. <https://doi.org/10.5923/j.ijaf.20130307.03>
- Pena-Vergara, G., Castro, L. R., Gasparetto, C. A., & Bizzo, W. A. (2022). Energy from planted forest and its residues characterization in Brazil. *Energy*, 239, 122243. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122243>
- Rasoulkhani, M., Ebrahimi-Nik, M., Abbaspour-Fard, M. H., & Rohani, A. (2018). Comparative evaluation of the performance of an improved biomass cook stove and the traditional stoves of Iran. *Sustainable Environment Research*, 28(6), 438–443. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2018.08.001>
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
- Santos, M. D., Costa, I. P. D. A., & Gomes, C. F. S. (2021). MULTICRITERIA DECISION-MAKING IN THE SELECTION OF WARSHIPS: A NEW APPROACH TO THE AHP METHOD. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 13(1). <https://doi.org/10.13033/ijahp.v13i1.833>

Sutar, K. B., Kohli, S., Ravi, M. R., & Ray, A. (2015). Biomass cookstoves: A review of technical aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *41*, 1128–1166. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.003>

TEAM, R. C. (2021). *R: The R Project for Statistical Computing* (Versão 4.1.1) [R]. The R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>

Urmee, T., & Gyamfi, S. (2014). A review of improved Cookstove technologies and programs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *33*, 625–635. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.019>

Yunusa, S. U., Mensah, E., Preko, K., Narra, S., Saleh, A., Sanfo, S., Isiaka, M., Dalha, I. B., & Abdulsalam, M. (2023). Biomass cookstoves: A review of technical aspects and recent advances. *Energy Nexus*, *11*, 100225. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100225>