

Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Perfil térmico e emissões gasosas na cocção de pizzas mediante o uso de
madeira como combustível

Elias Costa de Souza

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em:
Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba
2023

Elias Costa de Souza
Engenheiro Florestal

**Perfil térmico e emissões gasosas na cocção de pizzas mediante o uso de madeira como
combustível**

versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ OTÁVIO BRITO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em:
Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Souza, Elias Costa de

Perfil térmico e emissões gasosas na cocção de pizzas mediante o uso de madeira como combustível / Elias Costa de Souza. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2023.

67 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Combustão da madeira 2. Emissões gasosas 3. Cocção de alimentos 4. Biomassa para energia 5. Fornos de pizza 6. Análise energética I. Título

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família, por terem acreditado em mim, especialmente aos meus pais Rita de Cássia Lima da Costa Souza e José Eduardo de Souza, e à minha amada irmã Maria Luiza Costa de Souza.

Este trabalho também é dedicado a todos os jovens nordestinos, pobres, batalhadores, que acreditam em um futuro melhor para e com os seus. O mundo é nosso!

AGRADECIMENTOS

Agradeço, inicialmente, aos meus pais (Rita de Cássia Lima da Costa Souza e José Eduardo de Souza) e a minha irmã (Maria Luiza Costa de Souza) por acreditarem que era possível e por fazerem o possível (e o impossível) para garantir a minha chegada e a minha instalação em Piracicaba. Só nós sabemos as lutas e os perrengues que foram necessários. Ainda não cheguei nem perto de onde eu quero chegar, mas cada vitória é importante e cada batalha vencida é por vocês e para vocês!

Ao meu orientador, prof. Dr. José Otávio Brito, pelo conhecimento repassado ao longo dos anos, por suas dicas filosóficas que me fizeram refletir sobre a problemática da nossa pesquisa desde a primeira reunião, por todo apoio que possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa e por confiar nas minhas escolhas durante o desenvolvimento do projeto.

Ao meu coorientador, amigo e grande mestre, prof. Dr. Ananias Francisco Dias Júnior por todo conhecimento repassado, todas as discussões científicas no laboratório, por acreditar em mim e mostrar os passos a serem seguidos para alcançar o sonho da docência no ensino superior. Deixo aqui a minha admiração e respeito pelo cientista e professor que és. Deixo aqui, também, o meu agradecimento público por contribuir de maneira tão significativa na minha formação como professor universitário e por me mostrar que é possível ser e fazer diferente, contribuindo com o processo de ensino-aprendizagem de forma humana e digna.

À FEALQ (Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz) pelo auxílio concedido no início do Doutorado, o que garantiu a minha permanência em Piracicaba e me fez chegar até aqui, hoje. O trabalho e os auxílios disponibilizados pela Fundação são fundamentais para diversos alunos como eu. À CAPES, pela bolsa concedida ao longo do curso. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Ao Programa de Pós-graduação em Recursos Florestais (PPGRF) por todo suporte disponibilizado para que eu conseguisse me desenvolver dentro e fora da pós-graduação. Mais que um Doutor, o PPGRF tornou possível a formação de um Professor que vê a educação com outros olhos, graças ao conjunto de atividades disponibilizadas pelo programa e pela liberdade que o programa dá aos pós-graduandos na condução dos seus trabalhos. Em especial, agradeço a querida Gi (Giovanna Monteiro) por todas as conversas, por todo apoio e por toda torcida ao longo dessa caminhada. Sem dúvidas, Gi também é uma das grandes colaboradoras deste trabalho.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo, por todo suporte na minha formação como profissional. É motivo de orgulho falar sobre a Gloriosa e sobre os grandes profissionais que por lá passaram.

Ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo pelo apoio no desenvolvimento de atividades de ensino, pesquisa e extensão durante o meu curso, que contribuíram de maneira significativa para a minha formação docente.

À Bruna e ao José Wagner (Xuleta) por todo apoio na chegada e adaptação em Piracicaba, por me influenciarem em vários aspectos positivos na minha vida e por terem tornado o início da pandemia um pouco menos aterrorizante.

Aos amigos do Laboratório de Energia da Biomassa da Universidade Federal do Espírito Santo (LEB/UFES) por todo apoio e companheirismo ao longo da reta final do curso, em especial a Allana Katiussya Álison Moreira, Gabriela Mayrinck, e João Ucella. As discussões científicas eram ótimas, mas os momentos de descontração eram ainda melhores. Aqui incluo o meu agradecimento à Fernanda Moura, que também contribuía de maneira significativa nestes momentos, seja na organização impecável dos eventos mais simples ou até mesmo nas

ideias mais aleatórias possíveis. Sem vocês, esta reta final não teria sido da maneira que foi. Obrigado por todo suporte, compreensão e compartilhamento de informações não-científicas através do nosso grupo. Aos outros amigos que passaram por aqui e não mencionei, saibam que são tão importantes quanto estes. Os levo em meu coração.

À Dalza e ao Marcelo Simonato por terem cedido o espaço do Sítio Alegratto para a construção do forno e, bem mais que isso, por terem me adotado como um filho durante a minha estadia em Jerônimo Monteiro. Nunca irei esquecer das boas conversas com o Marcelão, das ótimas refeições e dicas culinárias da Dalza, do melhor sorvete natural e do melhor empadão que já comi, sem contar com as maravilhosas pizzas que comemos durante os testes do forno. Foram muitas comidas, muitas conversas e ótimos momentos. Vocês foram essenciais para a realização deste trabalho, nunca esqueçam disso. Obrigado pela disponibilidade e pelo entusiasmo de contribuir com a educação do país.

Aos amigos de Campo Redondo que, durante todo esse período de formação acadêmica, não me abandonaram, apesar das minhas ausências. As férias eram melhores quando vocês estavam todos presentes na cidade. Em especial, Everton, Janine, Julyeth, Livia e Massi. Agradeço, também, aos amigos que a Universidade do Estado do Pará me deu recentemente, em especial aos que acompanharam mais de perto o processo de finalização desta tese, mesmo com a correria das disciplinas e atividades no laboratório, e me incentivaram para que esta conclusão fosse possível.

Às centenas de pessoas que contribuíram para a minha formação, mesmo nos menores atos possíveis, mas que fazem a diferença para eu ser quem eu sou hoje, meu muito obrigado.

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	9
LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE TABELAS.....	12
1. INTRODUÇÃO.....	13
Referências.....	14
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1. Uso da lenha na cocção de alimentos.....	17
2.2. Utilização da lenha em pizzeria.....	17
2.3. Poluentes atmosféricos.....	18
2.4. Dinâmica térmica em fornos de pizza.....	20
Referências.....	21
3. FORNO DE ALVENARIA COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL PARA A COCCÃO DE ALIMENTOS E REDUÇÃO DAS EMISSÕES GASOSAS.....	25
Resumo.....	25
Abstract.....	25
3.1. Introdução.....	26
3.2. Material e Métodos.....	27
3.2.1. Avaliação de forno comercial em atividade.....	27
3.2.2. Construção do forno experimental.....	28
3.2.3. Coleta de temperatura em forno experimental.....	30
3.3. Resultados e Discussão.....	31
3.3.1. Forno comercial.....	31
3.3.2. Cura e utilização do forno experimental para cocção de pizzas.....	33
3.3.3. Benefícios diretos e indiretos da instalação de um forno de alvenaria para a cocção de alimentos.....	35
3.3.4. Aplicações práticas e pesquisas futuras.....	37
3.4. Conclusões.....	38
Referências.....	39
4. RELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS TÉCNICOS DA LENHA E EMISSÕES GASOSAS NO PROCESSO DE COCCÃO DE ALIMENTOS.....	41
Resumo.....	41

Abstract.....	41
4.1. Introdução.....	42
4.2. Material e Métodos.....	43
4.2.1. Coleta e preparo da lenha.....	43
4.2.2. Caracterização física das madeiras.....	43
4.2.3. Caracterização química e energética das madeiras.....	44
4.2.4. Simulações de cocção de pizzas em forno de alvenaria.....	45
4.2.5. Análise dos efluentes gasosos emitidos durante a cocção.....	46
4.2.6. Análise dos dados.....	47
4.3. Resultados e Discussão.....	48
4.3.1. Características físicas das madeiras.....	48
4.3.2. Características químicas e energéticas das madeiras.....	49
4.3.3. Análise das cocções.....	54
4.3.4. Análise dos efluentes gasosos emitidos durante a cocção.....	57
4.3.5. Aplicações práticas e futuras pesquisas.....	60
4.4. Conclusões.....	61
Referências.....	61
Material suplementar.....	65
5. CONCLUSÕES GERAIS.....	67

RESUMO

Perfil térmico e emissões gasosas na cocção de pizzas mediante o uso de madeira como combustível

Apesar do grande consumo de pizzas ao redor do mundo, estudos que investiguem de maneira técnica e científica os processos que ocorrem nos fornos de cocção de pizzas ainda são escassos. O objetivo geral desta tese foi investigar o uso da madeira na cocção de pizza, considerando as características do combustível, o balanço energético do processo e as emissões de efluentes gasosos da combustão. No primeiro capítulo, foram discutidos os aspectos técnicos da construção do forno de alvenaria para produção de pizzas e como ele pode ser uma alternativa eficiente para populações em geral e pequenos comerciantes visando minimizar os problemas relacionados à baixa qualidade do ar no interior dos estabelecimentos residenciais e comerciais. Foram considerados o tempo de construção e tempo de cura do forno de alvenaria, bem como os possíveis impactos positivos que esta construção poderia gerar direta e indiretamente para estas comunidades. Os resultados foram comparados com os dados coletados em um forno comercial em funcionamento há mais de 10 anos, observando o perfil térmico e a estabilização da temperatura durante a cocção das pizzas e o consumo de lenha durante o uso do forno. No segundo capítulo, foram avaliadas as características das três espécies de madeiras e os parâmetros da combustão da lenha no forno de alvenaria. O perfil térmico do forno foi definido, o consumo de lenha foi calculado em relação à produção de pizzas e os efluentes gasosos emitidos durante a cocção de pizzas foram avaliados. Com os dados das emissões gasosas, foi possível realizar correlações com as propriedades das madeiras avaliadas. Além disso, estes dados foram correlacionados de acordo com as diferentes fases da cocção (aquecimento, cocção e resfriamento), onde as diferentes faixas de temperatura do forno foram relacionadas com as emissões gasosas coletada na chaminé e na porta do forno. A partir disso, foi possível entender como a composição química das espécies pode influenciar nas emissões de elementos potencialmente nocivos durante a cocção das pizzas. A temperatura também foi identificada como um fator importante que pode influenciar a quantidade e a qualidade dos gases liberados durante a combustão em um forno de alvenaria. Os resultados demonstram que os fornos de pizza podem ser uma alternativa para populações que sofrem com problemas relacionados à baixa qualidade do ar no interior das residências. Além disso, foi observado que as características físico-químicas das madeiras, especialmente densidade básica, teor de holocelulose e teor de extrativos, se correlacionam com a emissão de efluentes gasosos durante a combustão em forno de pizza. Estudos futuros devem focar em análises com espécies madeireiras que possuam diferentes características físico-químicas, a partir disso, pode ser possível estabelecer parâmetros mais específicos para indicar o uso de outras espécies para na cocção de pizzas. Também com vistas à melhorias no processo de cocção, estudos que avaliem a implementação de melhorias nos aspectos físicos do forno, como a utilização de sistemas de exaustão modernos, também devem ser realizados.

Palavras-chave: Combustão da madeira, Emissões gasosas, Cocção de alimentos, Biomassa para energia, Fornos de pizza, Análise energética

ABSTRACT

Thermal profile and gaseous emissions in pizza cooking using wood as fuel

Despite the large consumption of pizzas around the world, studies that technically and scientifically investigate the processes that occur in pizza cooking ovens are still scarce. The general aim of this thesis was to investigate the use of wood in pizza cooking, considering the characteristics of the fuel, the energy balance of the process and the emissions of gaseous effluents from combustion. In the first chapter, the technical aspects of building a masonry oven for pizza production were discussed and how it can be an efficient alternative for populations in general and small businesses to minimize problems related to poor air quality inside residential and commercial establishments. The construction time and curing time of the masonry oven were considered, as well as the possible positive impacts that this construction could generate directly and indirectly for these communities. The results were compared with data collected in a commercial oven in operation for over 10 years, observing the thermal profile and temperature stabilization during pizza cooking and the consumption of firewood while using the oven. In the second chapter, the characteristics of the three wood species and the firewood combustion parameters in the pizza oven were evaluated. The thermal profile of the oven was defined, the consumption of firewood was calculated in relation to the production of pizzas and the gaseous effluents emitted during the cooking of pizzas were evaluated. With the gaseous emissions data, it was possible to perform correlations with the properties of the evaluated woods. In addition, these data were correlated according to the different cooking phases (heating, cooking and cooling), where the different oven temperature ranges were related to the gaseous emissions collected in the chimney and oven door. From this, it was possible to understand how the chemical composition of the species can influence the emissions of potentially harmful elements during the cooking of pizzas. Temperature has also been identified as an important factor that can influence the quantity and quality of gases released during combustion in a pizza oven. The results demonstrate that pizza ovens can be an alternative for populations that suffer from problems related to poor indoor air quality. In addition, it was observed that the physicochemical characteristics of the woods, especially basic density, holocellulose content and extractive content, correlate with the emission of gaseous effluents during combustion in a pizza oven. Future studies should focus on analyzes with wood species that have different physicochemical characteristics, based on this, it may be possible to establish more specific parameters to indicate the use of other species for cooking pizzas. Also with a view to improving the cooking process, studies that evaluate the implementation of improvements in the physical aspects of the oven, such as the use of modern exhaust systems, should also be carried out.

Keywords: Wood combustion, Gaseous emissions, Food cooking, Biomass for energy, Pizza ovens, Energy analysis

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pontos de coleta de temperatura no forno de cocção de pizzas em escala comercial	28
Figura 2. Vista frontal do sistema de cocção de alimentos, com o forno e a chaminé	29
Figura 3. Vista frontal e vista posterior do forno, indicando a posição dos termopares utilizados na coleta dos dados de temperatura	30
Figura 4. Temperaturas coletadas no forno comercial	31
Figura 5. Queimas realizadas no forno experimental	34
Figura 6. Vista lateral do forno, mostrando os três termopares laterais – 1, 2 e 3, de baixo para cima, respectivamente (A), vista frontal do forno, mostrando o termopar posicionado próximo à saída dos gases, que ocorre na coifa (seta laranja e preto) acoplada na porta do forno (B), os termopares são indicados pelas setas em vermelho e preto	45
Figura 7. (A) Fotografia do forno com o analisador de gases portátil posicionado próximo à porta (seta laranja); (B) Estrutura da chaminé e o analisador móvel posicionado ao lado com os tubos de coleta indo até a chaminé na área externa (seta vermelha)	47
Figura 8. Resumo metodológico destacando todas as etapas executadas na execução deste trabalho.....	47
Figura 9. Propriedades físicas das espécies avaliadas.....	48
Figura 10. Composição química das madeiras das espécies estudadas	50
Figura 11. Análise química imediata das madeiras estudadas	51
Figura 12. Características energéticas das madeiras das espécies estudadas	52
Figura 13. Curvas TG/DTG das madeiras das espécies estudadas	53
Figura 14. Espectro FT-IR das madeiras das espécies estudadas	54
Figura 15. Massa e volume de madeira de cada espécie utilizados nas cocções	55
Figura 16. Temperatura média do forno de acordo com as espécies utilizadas (A – C. citriodora; B – E. saligna; C – E. globulus)	56
Figura 17. Fotografias térmicas da parte interior do forno de cocção de pizzas, da direita para a esquerda simula a mesma direção no interior do forno, passando do lodo onde a madeira é inserida, a cúpula e o lado oposto à entrada da madeira	57
Figura 18. Efluentes gasosos emitidos durante a queima das diferentes espécies estudadas, coletados na chaminé	58

Figura 19. Efluentes gasosos, coletados próximos a porta, com a queima das diferentes espécies estudadas	59
Figura 20. Matriz de correlação das propriedades da madeira e efluentes gasosos emitidos durante a queima.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Material de construção do forno e seus respectivos valores cotados em dólar comercial	30
Tabela 2. Etapas da cocção e os parâmetros de definição de início e finalização de cada etapa ..	46

1. INTRODUÇÃO

A utilização de combustíveis não-renováveis continua trazendo uma série de questionamentos que envolvem a sustentabilidade do seu fornecimento e os seus prejuízos ao ambiente, considerando a matriz energética global. Nesse sentido, a madeira tem sido cada vez mais revalorizada como alternativa energética, o que tem sido muito facilitado, pela expressiva quantidade que dela já se faz uso para tal finalidade. A lenha foi a primeira fonte de energia utilizada na cocção de alimentos, as grandes revoluções humanas ocorreram devido ao controle do fogo, e até hoje podem ser observados os efeitos da utilização da madeira como fonte de energia, mesmo em grandes centros urbanos, como é o caso do seu uso nas pizzarias (Brito 2007; Harari 2018). Em 2021, a lenha e o carvão vegetal representam 8,7% da oferta de energia interna do Brasil, posicionando-se em terceiro lugar no ranking das energias renováveis disponíveis (Empresa de Pesquisa Energética 2022). Juntamente com o carvão vegetal, o consumo de lenha aumentou cerca de 1,4% na sua participação na oferta de energia interna, entre 2021 e 2022 (Empresa de Pesquisa Energética 2022). A lenha é uma das fontes de energia mais utilizadas na forma de calor na cocção de alimentos em estabelecimentos comerciais (padarias, pizzarias, etc.). Estima-se que, em todo o mundo, cerca de 1.9 bilhões de m³ de madeira foram utilizadas para a geração de energia, em 2018 (Food and Agriculture Organization of the United States 2020).

Devido ao impacto ambiental causado pelo uso desenfreado de florestas nativas para a geração de produtos florestais, que demandam grande quantidade de biomassa, as madeiras provenientes de plantios comerciais vêm sendo utilizadas como uma fonte de energia primária de alta importância no uso doméstico e industrial (Dias Júnior et al. 2015). Por ter um rápido crescimento e possuir madeira de boa qualidade, as espécies do gênero *Eucalyptus* são as mais utilizadas para os mais diversos fins no setor florestal, como no seguimento de celulose e papel, chapas e fibras, lenha, carvão vegetal entre outros (Dias Júnior et al. 2016). Mesmo com diversos estudos realizados em relação à composição química das diversas espécies de eucalipto, pouco ainda se sabe a respeito da influência da composição da sua madeira e da dinâmica do processo de combustão, como o que ocorre, por exemplo, durante a cocção de alimentos. Isso é ainda mais relevante, quando consideramos as emissões de materiais particulados, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) e outros efluentes gasosos.

Os materiais particulados, ou aerossóis atmosféricos, são partículas, que podem ser líquidas ou sólidas, encontradas em suspensão na atmosfera e podem ser oriundos de fontes naturais ou antropogênicas, como a queima de combustíveis sólidos (Godish 2003; Szramowiat-Sala et al. 2019). Os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA's) são compostos orgânicos hidrofóbicos os quais podem conter dois ou mais anéis aromáticos, constituídos apenas por átomos de carbono e hidrogênio, que podem ser gerados tanto de fontes naturais quanto de forma antropogênica, são considerados mutagênicos, carcinogênicos e vem atraindo a atenção de diversas organizações ao redor do mundo (Wenzl et al. 2006; Dias Júnior et al. 2018). Os HPA's produzidos por meio da queima de biomassas podem variar de acordo com o tipo de material utilizado e condições as quais se realiza a combustão do material, no que diz respeito à lenha utilizada na cocção de alimentos (pizzarias, padarias, etc), são necessários estudos que realizem análises quantitativas e qualitativas da produção destes compostos nos gases durante a queima do mesmo, visando compreender quais constituintes da madeira estão ligados ao aumento da emissão destes efluentes gasosos (Wenzl et al. 2006; Dias Júnior et al. 2018).

A ausência destas informações resulta na ausência de políticas públicas relacionadas às emissões gasosas resultantes destes fornos de pizza, o que pode implicar diretamente nas políticas ambientais estabelecidas como prioridades para diferentes governos ao redor do mundo à médio e longo prazo, como é o caso do Brasil. É preciso

salientar que, além dos impactos ambientais locais e globais causados pela liberação de diferentes poluentes à atmosfera, ainda existem os impactos à saúde humana pela exposição direta à fumaça (Falfán-Valencia et al. 2020). Assim, é urgente e necessária a realização de mais estudos que abordem a relação do combustível e do equipamento de queima com as emissões de efluentes gasosos, visando traçar estratégias de mitigação das emissões destes materiais, seja através de melhorias nos fornos de pizza, seja através da escolha das biomassas mais apropriadas, ou menos poluentes, para o uso nas pizzarias.

Assim, esta tese tem como objetivo principal investigar o comportamento da madeira na cocção de pizza, considerando as características do combustível frente ao perfil térmico do processo e as emissões de efluentes atmosféricos. A fim de avaliar os aspectos relacionados à construção e operacionalização do forno, definir os indicadores energéticos observados durante a cocção de alimentos em um forno comercial de pizzas e compreender como a composição química da biomassa pode influenciar nas emissões de efluentes durante a combustão, esta tese foi dividida em três capítulos. No primeiro capítulo é apresentada uma revisão de literatura sobre as principais problemáticas que envolvem este trabalho, passando desde a utilização de biomassas como combustíveis em pizzarias, emissão de efluentes gasosos durante a queima da biomassa, até aspectos relacionados à dinâmica térmica dentro de fornos de pizza. No segundo capítulo, são abordados os pontos relacionados à construção e operacionalização do forno, destacando a possibilidade de utilização desses fornos de alvenaria em pequenas comunidades, visando a melhoria da qualidade do ar no interior das residências e criando um espaço comunitário de cocção de alimentos, onde as principais cocções não são realizadas nas residências dos moradores e sim nestes espaços, garantindo uma redução no uso do combustível (lenha) e assegurando uma melhoria nos níveis de qualidade do ar no interior de suas residências. No terceiro capítulo, foram estudadas as propriedades físico-químicas das biomassas utilizadas para a cocção de alimentos e foram verificadas as emissões gasosas durante todas as etapas do processo (aquecimento, cocção e resfriamento). Com a caracterização das espécies realizadas, foi possível identificar quais propriedades da madeira que possuem maior ou menor influência nas emissões de efluentes gasosos nocivos à saúde humana e ao meio ambiente, para, a partir disso, sugerir estratégias de mitigação da emissão desses elementos.

Referências

- Brito JO (2007) O uso energético da madeira. *Estud Avancados* 21:185–193. <https://doi.org/10.1590/s0103-40142007000100015>
- Dias Júnior AF, Andrade CR, Brito JO, Lira SP, Andrade AM de, Souza ND de (2018) Polycyclic aromatic hydrocarbons in the organic phase extracted from charcoal for barbecue. *Rev Árvore* 41:. <https://doi.org/10.1590/1806-9088201700050001>
- Dias Júnior AF, Andrade AM de, Soares VW, Costa Júnior DS, Ferreira DHAA, Leles PS dos S (2015) Potencial energético de sete materiais genéticos de Eucalyptus cultivados no Estado do Rio de Janeiro. *Sci For* 43:. <https://doi.org/10.18671/scifor.v43n108.8>
- Dias Júnior AF, Costa Júnior DS da, Andrade AM de, Oliveira E de, Lana AQ, Brito JO (2016) Quality of Eucalyptus Wood Grown in Rio de Janeiro State for Bioenergy. *Floresta e Ambient* 23:435–442. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.140315>
- Empresa de Pesquisa Energética (2022) *Brazilian Energy Balance*. Rio de Janeiro

- Falfán-Valencia R, Ramírez-Venegas A, Pérez Lara-Albisua JL, Ramírez-Rodríguez SL, Márquez-García JE, Buendía-Roldan I, Gayosso-Gómez LV, Pérez-Padilla R, Ortiz-Quintero B (2020) Smoke exposure from chronic biomass burning induces distinct accumulative systemic inflammatory cytokine alterations compared to tobacco smoking in healthy women. *Cytokine* 131:155089. <https://doi.org/10.1016/j.cyto.2020.155089>
- Food and Agriculture Organization of the United States F (2020) FAOSTAT-Forestry database. Global production and trade in forest products in 2019. In: FAO. <http://www.fao.org/forestry/statistics/80938/en>. Accessed 24 Oct 2020
- Godish T (2003) *Air quality*, 3rd edn. Boca Raton: CRC Press
- Harari YN (2018) *Sapiens: Uma breve história da humanidade*, 1st edn. L&PM
- Szramowiat-Sala K, Korzeniewska A, Sornek K, Marczak M, Wierońska F, Berent K, Golaś J, Filipowicz M (2019) The properties of particulate matter generated during wood combustion in in-use stoves. *Fuel* 253:792–801. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.05.026>
- Wenzl T, Simon R, Anklam E, Kleiner J (2006) Analytical methods for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in food and the environment needed for new food legislation in the European Union. *TrAC Trends Anal Chem* 25:716–725. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2006.05.010>

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Uso da lenha na cocção de alimentos

A lenha foi a primeira fonte de energia utilizada na cocção de alimentos, as grandes revoluções humanas ocorreram devido ao controle do fogo, ou como é tratado historicamente, a sua domesticação, foi a partir do domínio do fogo que a humanidade passou a obter calor e se defender do ataque dos animais durante a noite, conseguiu enfrentar temperaturas mais baixas, o que permitiu explorar regiões que antes não podia chegar (Brito 2007; Harari 2018).

Os primeiros estudos da utilização da madeira como combustível indicam que o processo mais simples e econômico de transformação energética da madeira é a sua queima direta (combustão). A lenha como fonte de energia, possui diversas vantagens quando comparada a outras fontes renováveis. O rendimento energético do processo de combustão da madeira depende de sua constituição química e propriedades físicas, estas características variam de acordo com a espécie e é de grande importância para a escolha adequada da madeira a ser utilizada (Quirino et al. 2005).

Na Europa, a utilização da lenha no setor energético vem crescendo nos últimos anos, este crescimento ocorre, principalmente, devido à preocupação global em relação às mudanças climáticas e a busca constante por fontes de energia que sejam ambientalmente adequadas (Cincinelli et al. 2019). No caso da lenha, o fato da planta conseguir absorver, durante o seu crescimento, mais CO₂ do que emite durante a sua queima, contribui fortemente para a justificativa de adequação ao conceito de “carbono neutro” (Mehrpooya et al. 2018; Cincinelli et al. 2019).

O processo de combustão da madeira pode ser dividido em três ciclos:

- O primeiro ciclo é caracterizado pela perda da madeira, através do ganho de temperatura do material;
- No segundo ciclo, quando a temperatura se eleva, ocorre a quebra química das estruturas da madeira e, conseqüentemente, ocorre a liberação de matérias voláteis;
- O terceiro ciclo é onde ocorre a queima de todo o resto da lenha, onde o processo de liberação de gases ocorre até a finalização da queima.

Para a queima direta da lenha, é preferível utilizar madeiras com maior poder calorífico e maior densidade, pois estas propriedades se relacionam com o rendimento energético da reação de combustão que, por sua vez, influencia na dinâmica do processo de cocção (Quirino et al. 2005).

Durante a queima, são emitidos gases considerados nocivos e materiais particulados, que podem acarretar problemas de saúde. Tem-se observado em alguns estudos realizados na Europa que, no desenvolvimento de políticas ambientais, a combustão da lenha nas residências deve ser observado como fator relevante na produção de particulados e gases nocivos (Cincinelli et al. 2019).

2.2. Utilização da lenha em pizzeria

A fonte energética amplamente utilizada na cocção de alimentos em pizzarias ainda é a lenha. Só na cidade de São Paulo, a estimativa é de que aproximadamente 80% das pizzarias façam uso da lenha, destas, o gênero

Eucalyptus é o mais empregado (88%), em segundo lugar, as estão as espécies do gênero Pinus (8%) e as demais espécies representam a menor fração (4%) (de Albuquerque Sgarbi et al. 2013; Lima 2015).

O Eucalyptus spp., com as suas mais diversas espécies, possui um forte potencial já conhecido e explorado na área florestal, sendo capaz de produzir madeira e produtos não-madeireiros de qualidade para os mais diversos fins. Foi introduzido no Brasil em 1904 e, ao conseguir unir boas condições ambientais com conhecimentos silviculturais avançados sobre as mais variadas espécies do gênero, os pesquisadores puderam garantir ao Brasil uma boa vantagem na produção de madeira oriunda de florestas renováveis, principalmente se comparada a outros países (Lima 2015; Protásio et al. 2019).

Sabendo do potencial do eucalipto e que há condições ambientais, bem como conhecimentos silviculturais suficientes para garantir ao Brasil vantagem comparativa na produção de madeira oriunda de florestas renováveis, a seleção de espécies do gênero Eucalyptus para florestas energéticas de vem sendo realizada utilizando como base as pesquisas que caracterizam as propriedades tecnológicas da madeira, buscando uma homogeneização das propriedades tecnológicas da madeira e, desta forma, melhorando os rendimentos em carvão, teor de carbono, densidade do carvão entre outras propriedades que fazem com que as espécies sejam indicadas para o uso energético, tanto para uso direto quanto para produção de carvão (Protásio et al. 2019).

Para fins energéticos, tem-se utilizado o melhoramento genético, buscando madeiras de eucalipto que possuam um elevado potencial produtivo, unido com uma alta densidade e um alto teor de lignina, o que possibilitará uma maximização no rendimento da produção de carvão, através do uso da madeira mais densa, que possua maior poder calorífico e, também, uma constituição química adequada, o que resultará em lenha com melhores características energéticas e carvão de melhor qualidade (Paludzyszyn Filho 2008).

A introdução do gênero Pinus ocorreu, no Brasil, há aproximadamente um século e, a partir de 1966, com a lei de incentivos fiscais, a silvicultura das espécies deste gênero foi intensificada, outro ponto de relevância foi a adaptação da espécie às condições climáticas locais, que proporcionaram a rápida expansão dos plantios. As principais espécies utilizadas nos primeiros plantios foram Pinus taeda e Pinus elliotti, largamente utilizada na indústria madeireira, as espécies deste gênero passaram a ser utilizadas, também, na produção de energia (Trianoski 2012).

A combustão completa da lenha produz óxidos de nitrogênio e óxidos de enxofre em concentrações mais baixas, estes óxidos são formados durante as reações de oxidação que ocorrem durante o processo de combustão nos fornos de pizzaria, já no processo de combustão incompleta são emitidos altas concentrações de monóxido de carbono e é observada a alta concentração de compostos orgânicos (Lima 2015). A queima da lenha pode ser considerada uma fonte significativa de material particulado secundário, visto que os compostos orgânicos e os compostos voláteis apresentam alta reatividade (Gonçalves et al. 2010). Alguns estudos já apontam a presença de altas concentrações de elementos nocivos emitidos pela queima de combustíveis e este fator é decisivo na escolha do combustível mais apropriado para determinados usos (Cincinelli et al. 2019; Lima et al. 2020; Falfán-Valencia et al. 2020).

2.3. Poluentes atmosféricos

De acordo com a resolução do Conama nº 3, de 28/06/1990, é considerado poluente atmosférico qualquer forma de matéria ou energia com intensidade, quantidade, concentração, tempo ou características que não estejam de acordo com os padrões estabelecidos e que possa vir tornar o ar impróprio ou ofensivo à saúde, que seja

inconveniente ao bem-estar humano, que possa causar danos aos recursos naturais ou que possa ser prejudicial à segurança e às atividades da comunidade (CONAMA 1990).

- Material particulado

O material particulado, ou aerossol atmosférico, pode ser definido como sendo partículas, líquidas ou sólidas, que estão em suspensão na atmosfera e podem ser originadas de fontes naturais ou antropogênicas e podem possuir diversos tamanhos, composições químicas, propriedades físicas e geometria (Godish 2003; Lima et al. 2020). É um dos poluentes mais nocivos ao homem, visto que, por possuir variados formatos e tamanhos, partículas de menor tamanho podem causar lesões até mesmo nos tecidos do trato respiratório, quando inaladas (Martins 2010).

O material particulado pode ser oriundo de diversas fontes, tanto naturais quanto antrópicas. Se tratando de fontes antrópicas, as fontes podem ser classificadas como estacionárias (como uma chaminé de uma pizzaria) e as móveis (como escapamento de veículos) (Seinfeld, J. H.; Pandis 2016). No contexto dos grandes centros urbanos, as principais fontes de emissão de materiais particulados e outros poluentes são as atividades industriais, a queima de combustíveis fósseis e a queima da biomassa e, no contexto das pizzarias, a fonte de biomassa utilizada é majoritariamente lenha (Vicente and Alves 2018; Lima et al. 2020). Alguns estudos apontam que a combustão da lenha é uma fonte de material particulado, black carbon, dioxinas e compostos voláteis, como o xileno, benzeno e tolueno, que são substâncias consideradas carcinogênicas e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA's) (Guerranti et al. 2009).

- Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos

Os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA's) são produzidos através da pirólise de matérias orgânicas, combustão incompleta e por meio de processos geológicos, estão classificados na classe dos carcinogênicos e como poluentes químicos e ambientais (Plaza-Bolaños et al. 2010; Kauneliene et al. 2016; Sampaio et al. 2021). Podem estar presentes no ambiente como partículas ou até mesmo em forma de vapor, dependendo das condições atmosféricas, de onde o material foi originado e das propriedades individuais dos HPA's (Kauneliene et al. 2016).

Os HPA's estão divididos em leves (contém de dois a quatro anéis de benzeno fundidos) e pesados (contendo mais de quatro anéis de benzeno), estes apresentam maior toxicidade e maior estabilidade (Wenzl et al. 2006). Por si só, os HPA's não são tóxicos, mas quando o organismo identifica e tenta eliminar esta substância estranha, acaba adicionando grupos polares ao material, fazendo com a polaridade da partícula seja aumentada (European Commission 2002; Wongmaneepratip and Vangnai 2017).

Considerando os centros urbanos, uma das fontes de HPA's pode ser identificada nas pizzarias, particularmente, considerando que grande parte desses estabelecimentos comerciais utilizam a madeira como combustível (Lima 2015; Kauneliene et al. 2016). Junto com o material particulado, os HPA's e outros compostos orgânicos voláteis se apresentam como grandes grupos de efluentes gasosos que podem reduzir a qualidade local do ar e prejudicar a saúde humana (Szramowiat-Sala et al. 2019).

- Produtos da combustão completa e incompleta da biomassa

Além dos produtos já citados, outros efluentes, que são liberados em forma de gás durante a queima da madeira, também possuem sua relevância, especialmente pelos danos negativos que causam ao meio ambiente e à saúde humana, tanto de maneira direta quanto de maneira indireta (Wang et al. 2018; Yin et al. 2019; Tong et al.

2020). Estes elementos, como o CO₂, CH₄ e NO_x, entre outros, são responsáveis por causarem o efeito estufa, que causa problemas diretos e indiretos à saúde humana. Além disso, a alta exposição a fumaça da biomassa está associada com o desenvolvimento de diferentes doenças que prejudicam a saúde humana, como, por exemplo, doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC), asma e outras doenças pulmonares inflamatórias crônicas (Ramírez-Venegas et al. 2018; Falfán-Valencia et al. 2020).

A emissão destes elementos, quase sempre, está relacionada à problemas relacionados à baixa tecnologia dos equipamentos de queima, que, por serem ineficientes acabam realizando a combustão incompleta e ou combustões com alta liberação de outros poluentes através dos efluentes gasosos (WHO 2017). Estes problemas são urgentes e são necessários cada vez mais estudos que busquem soluções viáveis para a mitigação dos impactos da emissão dos efluentes gasosos, tanto em menor escala (no interior das residências) quanto em maior escala (liberação à atmosfera).

2.4. Dinâmica térmica em fornos de pizza

Tradicionalmente, fornos de cocção de alimentos utilizavam a biomassa como principal fonte de energia. Ao longo do tempo, com as modernizações e inclusão de diferentes tecnologias de aquecimento, parte desses fornos passaram a utilizar gás, eletricidade e até mesmo micro-ondas para realizar a cocção e aquecimento dos alimentos. Alguns estudos apontam que fornos de pizza, por exemplo, atingem temperaturas médias da cúpula variando igual a 430 °C e esta temperatura média é ainda maior no piso do forno (cerca de 485 °C) (Buonanno et al. 2010; Ciarmiello and Morrone 2016). Alguns fatores estão envolvidos no processo de cocção de pizzas durante o seu tempo no forno, como os fenômenos de transporte de massa e calor (Ciarmiello and Morrone 2016). Estes fenômenos, por sua vez, estão relacionados com as condições em que a queima da madeira ocorre dentro do forno, bem como com a estrutura física do forno, que irá influenciar diretamente na disponibilidade de calor e fluxo de ar dentro do forno (Ciarmiello and Morrone 2016).

No caso de fornos de pizza, as dimensões da cúpula, da porta de entrada e as propriedades isolantes dos materiais utilizados na construção, parecem influenciar de maneira significativa no alcance da alta temperatura dentro destes equipamentos de queima (Buonanno et al. 2010). Ou seja, a escolha dos materiais bem como o design de construção dos fornos pode garantir o sucesso e a rapidez no processo de cocção de pizzas. De maneira geral, os fornos de pizza são construídos em semicírculos, com materiais refratários em seu interior e com a presença de uma coifa, acoplada a uma chaminé, geralmente localizada próxima a porta do forno (Buonanno et al. 2010). Esta localização estratégica está relacionada à dinâmica dos gases dentro do forno, que também pode ser influenciada pela dinâmica do calor, onde o ar quente e com diferentes partículas, muitas delas poluentes, são retiradas através do processo de convecção e liberado pela chaminé (Buonanno et al. 2010).

Poucos estudos avaliam aspectos técnicos relacionados aos fornos de pizza, mesmo sabendo da grande presença desses fornos ao redor do mundo, seja em residências ou em estabelecimentos comerciais (Falciano et al. 2022). As informações que constam em testes reais indicam que a irradiação do calor ocorre através da cúpula do forno, bem como através do piso do forno, sempre com a maior concentração sendo observada onde a lenha se localiza no forno, diminuindo de maneira quase que proporcional com o distanciamento da fonte de calor (Buonanno et al. 2010). Estudos também apontam que este fluxo de massa e calor sofre interferência do pizzaiolo, durante o processo de cocção das pizzas, haja visto que a coifa e chaminé se localizam na porta de entrada do forno e este local é o mesmo que o operador do forno insere e retira as pizzas do forno (Buonanno et al. 2010). Assim,

mais estudos que avaliem a dinâmica térmica dentro destes sistemas de combustão são importantes, principalmente à nível real e não apenas utilizando simulação computadorizada, para garantir possíveis melhorias que possam ser implementadas no design dos fornos.

Referências

- Brito JO (2007) O uso energético da madeira. *Estud Avancados* 21:185–193. <https://doi.org/10.1590/s0103-40142007000100015>
- Buonanno G, Morawska L, Stabile L, Viola A (2010) Exposure to particle number, surface area and PM concentrations in pizzerias. *Atmos Environ* 44:3963–3969. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.07.002>
- Ciarmiello M, Morrone B (2016) Why not Using Electric Ovens for Neapolitan Pizzas? A Thermal Analysis of a High Temperature Electric Pizza Oven. *Energy Procedia* 101:1010–1017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.128>
- Cincinelli A, Guerranti C, Martellini T, Scodellini R (2019) Residential wood combustion and its impact on urban air quality in Europe. *Curr. Opin. Environ. Sci. Heal.* 8:10–14
- CONAMA (1990) RESOLUÇÃO CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990. Brazil
- de Albuquerque Sgarbi F, Simões AF, Moutinho dos Santos E, Paiva Salinas DT (2013) Fuelwood as an energy source for the commercial cooking sector – An overview analysis focused in the city of São Paulo, Brazil. *Biomass and Bioenergy* 58:313–321. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.09.007>
- European Commission (2002) Polycyclic Aromatic Hydrocarbons – Occurrence in foods, dietary exposure and health effects. Brussels - Belgium
- Falciano A, Masi P, Moresi M (2022) Performance characterization of a traditional wood-fired pizza oven. *J Food Sci* 87:4107–4118. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16268>
- Falfán-Valencia R, Ramírez-Venegas A, Pérez Lara-Albisua JL, Ramírez-Rodríguez SL, Márquez-García JE, Buendía-Roldán I, Gayosso-Gómez LV, Pérez-Padilla R, Ortiz-Quintero B (2020) Smoke exposure from chronic biomass burning induces distinct accumulative systemic inflammatory cytokine alterations compared to tobacco smoking in healthy women. *Cytokine* 131:155089. <https://doi.org/10.1016/j.cyto.2020.155089>
- Godish T (2003) *Air quality*, 3rd edn. Boca Raton: CRC Press
- Gonçalves C, Alves C, Evtuyugina M, Mirante F, Pio C, Caseiro A, Schmidl C, Bauer H, Carvalho F (2010) Characterisation of PM10 emissions from woodstove combustion of common woods grown in Portugal. *Atmos Environ* 44:4474–4480. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.07.026>
- Guerranti C, Cetta F, Perra G, Moroni A, Di Felice R, Focardi S, Sorbellini F, Azzara A, Cisternino F, Dharmo A, et al (2009) Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) levels in various food components and in human adipose tissue. A comparison with PAH values in the atmosphere. *GIMT - G Ital delle Mal del Torace* 63:397–404
- Harari YN (2018) *Sapiens: Uma breve história da humanidade*, 1st edn. L&PM
- Kauneliene V, Krugly E, Kliucininkas L, Stasiulaitiene I, Prasauskas T, Auzbikaviciute A, Bergqvist P-A, Tomsej T, Martuzevicius D (2016) PAHs in Indoor and Outdoor Air from Decentralized Heating Energy Production: Comparison of Active and Passive Sampling. *Polycycl Aromat Compd* 36:410–428. <https://doi.org/10.1080/10406638.2014.999949>
- Lima FDM (2015) Quantificação e caracterização físico-química do material particulado fino (MP2,5): queima de biomassa em fornos de pizzaria na cidade de São Paulo. Universidade de São Paulo

- Lima FDM, Pérez-Martínez PJ, de Fatima Andrade M, Kumar P, de Miranda RM (2020) Characterization of particles emitted by pizzerias burning wood and briquettes: a case study at Sao Paulo, Brazil. *Environ Sci Pollut Res* 27:35875–35888. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07508-6>
- Martins MAG (2010) Variação da composição e toxicidade do material particulado ao longo do dia na cidade de São Paulo. Universidade de São Paulo
- Mehrpooya M, Khalili M, Sharifzadeh MMM (2018) Model development and energy and exergy analysis of the biomass gasification process (Based on the various biomass sources). *Renew. Sustain. Energy Rev.* 91:869–887
- Paludzyszyn Filho E (2008) Melhoramento do eucalipto para a produção de energia. *Rev Opiniões* 15:
- Plaza-Bolaños P, Frenich AG, Vidal JLM (2010) Polycyclic aromatic hydrocarbons in food and beverages. *Analytical methods and trends. J Chromatogr A* 1217:6303–6326. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2010.07.079>
- Protásio T de P, Scatolino MV, de Araújo ACC, de Oliveira AFCE, de Figueiredo ICR, de Assis MR, Trugilho PF (2019) Assessing Proximate Composition, Extractive Concentration, and Lignin Quality to Determine Appropriate Parameters for Selection of Superior Eucalyptus Firewood. *BioEnergy Res* 12:626–641. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10004-x>
- Quirino WF, Teixeira Do Vale A, Ana ;, Abreu De Andrade P, Lúcia V, Abreu S, Cristina A, Azevedo S (2005) PODER CALORÍFICO DA MADEIRA E DE MATERIAIS LIGNO-CELULÓSICOS Publicado na Revista da Madeira nº 89 abril 2005 pag 100-106
- Ramírez-Venegas A, Velázquez-Uncal M, Pérez-Hernández R, Guzmán-Bouilloud NE, Falfán-Valencia R, Mayar-Maya ME, Aranda-Chávez A, Sansores RH (2018) Prevalence of COPD and respiratory symptoms associated with biomass smoke exposure in a suburban area. *Int J Chron Obstruct Pulmon Dis Volume* 13:1727–1734. <https://doi.org/10.2147/COPD.S156409>
- Sampaio GR, Guizellini GM, da Silva SA, de Almeida AP, Pinaffi-Langley ACC, Rogero MM, de Camargo AC, Torres EA (2021) Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Foods: Biological Effects, Legislation, Occurrence, Analytical Methods, and Strategies to Reduce Their Formation. *Int J Mol Sci* 22:6010. <https://doi.org/10.3390/ijms22116010>
- Seinfeld, J. H.; Pandis SN (2016) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, 3rd edn. Wiley
- Szramowiat-Sala K, Korzeniewska A, Sornek K, Marczak M, Wierońska F, Berent K, Golaś J, Filipowicz M (2019) The properties of particulate matter generated during wood combustion in in-use stoves. *Fuel* 253:792–801. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.05.026>
- Tong S, Kong L, Yang K, Shen J, Chen L, Jin S, Wang C, Sha F, Wang L (2020) Characteristics of air pollution episodes influenced by biomass burning pollution in Shanghai, China. *Atmos Environ* 238:117756. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117756>
- Trianoski R (2012) Avaliação da qualidade da madeira de espécies de Pinus tropicais por meio de métodos convencionais e não destrutivos. Universidade Federal do Paraná
- Vicente ED, Alves CA (2018) An overview of particulate emissions from residential biomass combustion. *Atmos. Res.* 199:159–185
- Wang J, Xi F, Liu Z, Bing L, Alsaedi A, Hayat T, Ahmad B, Guan D (2018) The spatiotemporal features of greenhouse gases emissions from biomass burning in China from 2000 to 2012. *J Clean Prod* 181:801–808. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.206>

- Wenzl T, Simon R, Anklam E, Kleiner J (2006) Analytical methods for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in food and the environment needed for new food legislation in the European Union. *TrAC Trends Anal Chem* 25:716–725. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2006.05.010>
- WHO WHO (2017) *Burning Opportunity: Clean Household Energy for Health, Sustainable Development, and Wellbeing of Women and Children*. World Health Organization
- Wongmaneepratip W, Vangnai K (2017) Effects of oil types and pH on carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in grilled chicken. *Food Control* 79:119–125. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.03.029>
- Yin S, Wang X, Zhang X, Guo M, Miura M, Xiao Y (2019) Influence of biomass burning on local air pollution in mainland Southeast Asia from 2001 to 2016. *Environ Pollut* 254:112949. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.117>

3. FORNO DE ALVENARIA COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL PARA A COCÇÃO DE ALIMENTOS E REDUÇÃO DAS EMISSÕES GASOSAS

Resumo

Com a utilização da madeira para a cocção de alimentos em equipamentos pouco eficientes dentro das residências ou em ambientes de pouca circulação e a grande liberação de efluentes gasosos, muitos deles nocivos à saúde humana e ao meio ambiente, a qualidade do ar no interior das residências é reduzida de maneira significativa. Assim, o objetivo deste trabalho é investigar a possibilidade de implementação de fornos de alvenaria para a cocção de alimentos como uma alternativa para a redução da emissão de poluentes no interior de residências. Para isto, um forno comercial em atividade há mais de 10 anos foi avaliado, sendo verificado o seu perfil térmico e a dinâmica de funcionamento e consumo de lenha, a fim de servir como base para a construção de um forno que pudesse simular todo o processo em escala real. Com as informações coletadas, um forno experimental, em escala comercial, foi construído e instrumentalizado, e foram avaliados os processos de cura do forno e as primeiras queimas realizadas no equipamento. Com isso, foram discutidos aspectos importantes, relacionados principalmente com a construção e a operação do forno, que podem auxiliar na implementação deste equipamento em pequenas comunidades e contribuir de maneira significativa para a melhoria na qualidade do ar no interior de residências que utilizam fogões tradicionais e pouco eficientes. Foi observado que o forno de alvenaria possui um processo de construção relativamente simples e rápido, com um tempo de cura rápido, principalmente considerando o seu tamanho (cúpula com 1,80 m de diâmetro) e sua capacidade de produção (66 pizzas por hora), e teve seu processo de cura acelerado com a ação da temperatura, em um processo que, além de eliminar a umidade da estrutura, garante uma melhoria na estrutura e suporte para a realização das cocções. Para isto, é necessária apenas uma primeira queima de média duração (± 10 h), com a lenha concentrada no centro do forno, para garantir a distribuição igualitária de calor na cúpula e no piso do forno, sendo esta primeira queima essencial. Além disso, foi observado que o forno consegue atingir altas temperaturas ($+ 750$ °C), ideais para a cocção de massas e outros alimentos, e estas temperaturas estão distribuídas em diferentes intensidades ao longo da estrutura do forno, o que permite a cocção de diversos alimentos de maneira simultânea. O custo médio para a construção em (2021) foi de \$ 1.427,28 e, do ponto de vista técnico, a instalação desses fornos é viável e, com o correto investimento dos tomadores de decisão do setor público e/ou privado, pode impactar diretamente na qualidade do ar no interior das residências, já que as famílias passarão a cozinhar seus alimentos em locais externos e em equipamentos apropriados para tal. Estudos futuros devem focar tanto na qualidade dos combustíveis (madeira) utilizados nestes fornos quanto no desenvolvimento de melhorias dos aspectos termodinâmicos dos fornos. Além disso, estudos sobre a viabilidade econômica da implementação desses fornos também devem ser realizados.

Palavras-chave: Poluição do ar doméstico, emissão gasosa, energia da biomassa, saúde humana

Abstract

With the use of wood for cooking food in inefficient equipment inside homes, the significant release of gaseous effluents, which are harmful to human health and the environment, significantly reduces the air quality inside these homes. Thus, this work aims to investigate the possibility of implementing masonry ovens for cooking food as an alternative for reducing the emission of pollutants inside homes. For this, a commercial oven in operation for more than ten years was evaluated, verifying its thermal profile and the dynamics of operation and consumption of firewood. With the information collected, a full-scale experimental furnace was built and instrumented, and the furnace curing processes and the first firings carried out in the equipment were evaluated. With this, important aspects were discussed that could help implement this equipment in small communities and contribute significantly to improving the air quality inside homes that use traditional and inefficient stoves. It was observed that the oven has a relatively simple and fast

construction process, with a short curing time, accelerated with the action of temperature, in a process that, in addition to eliminating moisture from the structure, guarantees an improvement in the system and support for carrying out the cooking. For this, only a medium duration (± 10 h) first burn is necessary, with the firewood concentrated in the center of the kiln, to guarantee the equal distribution of heat in the dome and on the oven floor. Furthermore, it was observed that the oven reaches high temperatures ($+ 750$ °C), ideal for cooking pasta and other foods. These temperatures are distributed in different intensities along the structure of the oven, which allows the cooking of different foods simultaneously. The average construction cost is \$1,427.28, and, from a technical point of view, the installation of these ovens in small communities is feasible and, with the correct investment by decision-makers in the public or private sector, can directly impact the air quality inside the residences, since families will start to cook their food in external places and in appropriate equipment for this purpose. Future studies should focus on the quality of the fuels (wood) used in these kilns and on the development of improvements in the thermodynamic aspects of the kilns. In addition, studies on the economic viability of implementing these furnaces must also be carried out.

Keywords: Household air pollution, gaseous emission, biomass energy, human health

3.1. Introdução

A madeira foi uma das primeiras fontes de energia utilizada pelo homem, desde muito tempo. Por ser de fácil utilização e ter grande disponibilidade em diferentes formações ecológicas, a madeira ainda é largamente utilizada nos dias de hoje. Estima-se que um sétimo de todo o suprimento de energia primária do mundo seja abastecido pela biomassa e nos países em desenvolvimento este número pode chegar até 40% (Jain and Sheth 2019). A Organização Mundial de Saúde (OMS), estima que cerca de 2,6 bilhões de pessoas ainda cozinham usando fogueiras abertas ou equipamentos com baixa tecnologia tendo como combustível querosene, madeira, fezes de animais, resíduos agrícolas e carvão mineral (Kirch et al. 2018; WHO 2021). E isso gera uma séria preocupação devido ao alto índice de doenças relacionadas com a baixa qualidade do ar no interior das residências e devido ao alto índice de mortalidade prematura relacionada ao mesmo problema (cerca de 4 milhões de mortes prematuras todos os anos) (WHO 2021). Estes fatores, além dificultarem o avanço das questões relacionadas às mudanças climáticas e ao desenvolvimento desses países, impactam diretamente na saúde dessas populações, especialmente em países em desenvolvimento, que sofrem a com baixa assistência à saúde destas comunidades.

Alguns estudos realizados já avaliaram os impactos negativos da baixa qualidade do ar no interior das residências que utilizam biomassa para cocção, aquecimento ou iluminação (Gordon et al. 2014; Sana et al. 2019). A baixa qualidade do ar no interior dessas residências está associada diretamente a problemas de saúde de diversos tipos, variando entre doenças no sistema respiratório, especialmente no pulmão, e outras doenças associadas, como doenças cardíacas (da Silva et al. 2012; Carmo Moreira et al. 2013; Deng et al. 2020). Em alguns países, a solução mais comum para evitar a baixa qualidade no interior das residências é tentar cozinhar fora de casa. No entanto, estudos que avaliaram a saúde de pessoas expostas à fumaça da biomassa durante a cocção de alimentos já demonstram que, apesar de reduzir a exposição e, conseqüentemente, reduzir o surgimento de doenças relacionadas à qualidade do ar, fogueiras no exterior das residências não são a solução mais adequada para reduzir os problemas relacionados com a qualidade do ar (WHO 2017). Para tentar solucionar estes problemas, ações como as da Clean Cooking Alliance buscam alternativas em pequenas escalas para auxiliarem estas famílias (Clean Cooking Alliance 2022). Visando solucionar outros problemas, como a disponibilidade de combustível e capacidade de cocção, outras alternativas ainda são necessárias.

A nossa hipótese é a de que os fornos de alvenaria comercialmente utilizados por pizzarias ao redor do mundo podem se apresentar como uma possível solução para a substituição de equipamentos de queima no interior de residências. Haja visto o grande espaço interno dos fornos e a distribuição de calor que ocorre no seu interior, os fornos podem ser capazes de cozinhar outros tipos de alimentos, como pães e outras massas, até mesmo cozinhar proteínas e outros alimentos. Por se tratar de fornos desenhados para se manterem ligados por grandes períodos consumindo uma quantidade de lenha relativamente baixa, além de contribuir para a redução no consumo de lenha, o que tem impactos financeiros e ambientais diretos, a construção de um forno em alguma área central de pequenas comunidades pode permitir uma redução na utilização dos fogões e fogareiros no interior das residências ou nas áreas externas e muito próximas aos lares. Mas quais são os parâmetros básicos de construção desses fornos e como garantir a sua correta utilização?

Neste artigo, serão discutidos os custos e processos relacionados à construção de fornos de alvenaria, tradicionalmente utilizados em estabelecimentos comerciais denominados de pizzarias, e os processos de cura e queimas iniciais para garantir o bom funcionamento deste equipamento. Estas análises relacionadas à construção e cura de fornos de pizza são escassas na literatura, onde não são encontrados estudos semelhantes, e podem servir de base para uma série de novos estudos que busquem alternativas sustentáveis de cocção de alimentos garantindo uma melhoria na qualidade do ar no interior das residências que cozinham utilizando lenha ou outras biomassas como combustível. Assim, o objetivo deste trabalho é investigar a possibilidade de implementação de fornos de alvenaria para a cocção de alimentos como uma alternativa para a redução da emissão de poluentes no interior de residências.

3.2. Material e Métodos

3.2.1. Avaliação de forno comercial em atividade

Para nortear a construção de um forno experimental, foi avaliado um forno tradicional, em estabelecimento comercial (pizzaria), com funcionamento há mais de 10 anos. Foram realizadas quatro visitas ao estabelecimento e nestas visitas, além de conversas com os pizzaiolos responsáveis pelo controle do forno sobre a dinâmica do forno e da pizzaria, foram coletadas informações de consumo de lenha diário e mensal, além de informações sobre a produção diária e mensal de pizzas, a fim de relacionar o consumo de lenha de acordo com a produção de pizzas.

Além das informações sobre a lenha, foram coletadas as temperaturas médias do forno, com o auxílio de um termômetro infravermelho digital, da marca Incoterm, modelo ST-800, com caneta a laser e capacidade máxima de temperatura medida igual a 850 °C, com precisão de 1 °C. As temperaturas foram coletadas em quatro pontos do forno comercial, como ilustra a Figura 1. As temperaturas foram coletadas durante os primeiros 300 min de queima, com dados coletados em intervalos de 20 min e com a primeira coleta iniciando aos 20 min após a ignição, totalizando 280 min de coleta.

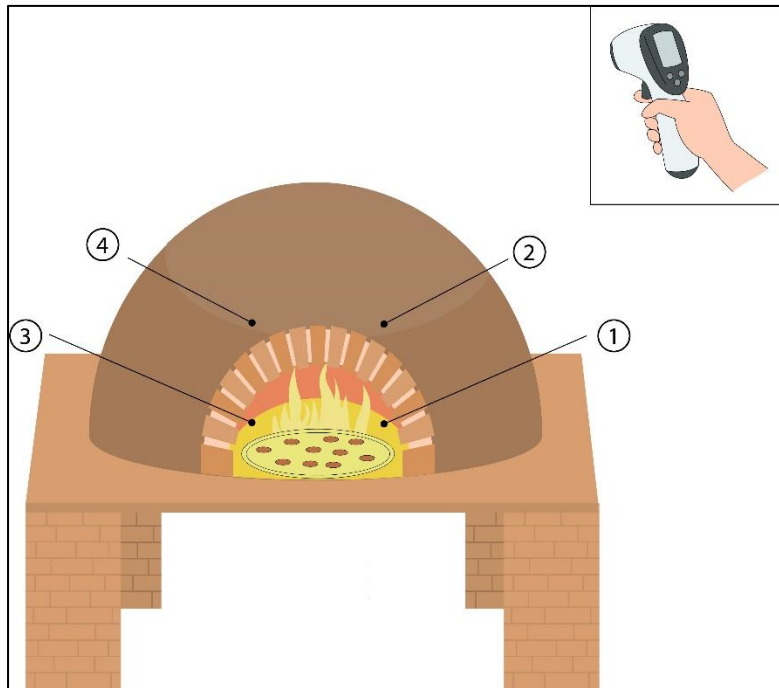


Figura 1. Pontos de coleta de temperatura no forno de cocção de pizzas em escala comercial

Onde: 1= Ponto de coleta no lastro do forno, próximo às chamas; 2= Ponto de coleta na cúpula, logo acima das chamas; 3= Ponto de coleta na cúpula, lado contrário às chamas; 4= Ponto de coleta no lastro do forno, local onde as pizzas passam pela cocção.

Com base nas dimensões e na dinâmica de atividades do forno comercial avaliado, foram definidos os padrões de construção para o forno experimental, levando em consideração os locais de maior ocorrência das emissões gasosas, para, assim, definir os pontos de atenção para a coleta dos efluentes gasosos, bem como os pontos que mereciam maior atenção para a coleta de temperatura, para a definição da localização dos termopares.

3.2.2. Construção do forno experimental

Para o desenvolvimento deste trabalho, inicialmente, foi construído um forno de alvenaria, do tipo comercial, tradicionalmente utilizado em pizzarias. O forno tem 2 m de altura, com a altura da cúpula igual a 0,8 m e chaminé, feita de aço inox, com altura total de 2 m. A porta do forno tem 0,4 m de altura e 0,6 m de largura. A vista frontal do sistema (forno + chaminé) é apresentado na Figura 2.

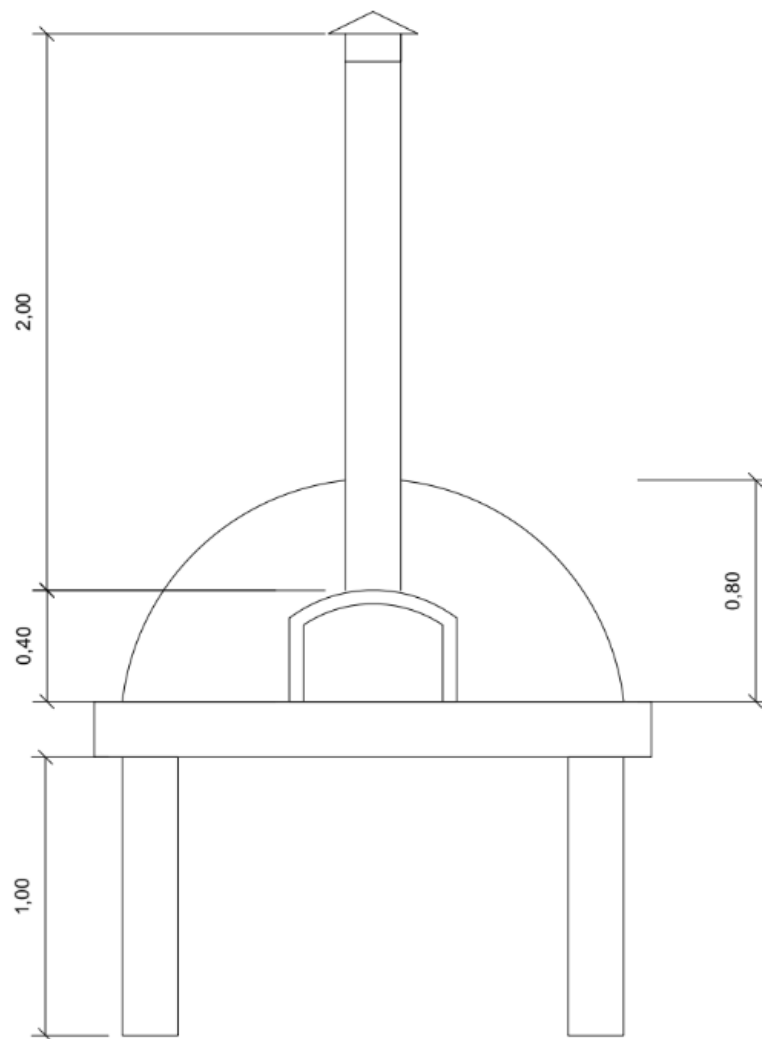


Figura 2. Vista frontal do sistema de cocção de alimentos, com o forno e a chaminé

Os materiais utilizados na construção e os valores gastos com cada material, de acordo com o valor do dólar em 30 Abril de 2021 (R\$ 5,44), período da construção, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Material de construção do forno e seus respectivos valores cotados em dólar comercial

Material	Valor unitário (\$)	Quantidade	Valor total (\$)
Tijolo de barro	0,19	800 un	152
Tijolo refratário	1,54	120 un	184,8
Massa refratária	2,31	36 sacos	83,16
Blocos de concreto	0,41	48 un	19,68
Areia	16,53	½ m³	8,26
Brita	0,61	12 latas	7,32
Argila	1,16	3 sacos	3,48
Cimento	5,44	5 sacos	27,2
Varas de ferro	6,12	3 (5 metros)	18,36
Tábuas	6,76	3 (0,3 metros)	20,28
Tábuas	5,21	3 (0,2 metros)	15,63
Escoras	0,73	2 (3 metros)	1,46
Prego	3,29	1 kg	3,29
Chaminé em Inox	275,74	1	275,74
Mão de obra	606,62	1	606,62
Valor total (\$)			1.427,28

3.2.3. Coleta de temperatura em forno experimental

Para a coleta de temperatura no forno experimental foram utilizados um conjunto de termopares acoplados ao redor da cúpula do forno, com três termopares na lateral direita, próximo ao local onde a madeira é inserida no forno, três termopares na lateral oposta, dois termopares na parte de trás do forno e um termopar próximo a saída dos gases pela chaminé, totalizando 9 termopares do tipo K (Figura 3). As coletas foram realizadas durante o processo de “cura” do forno.

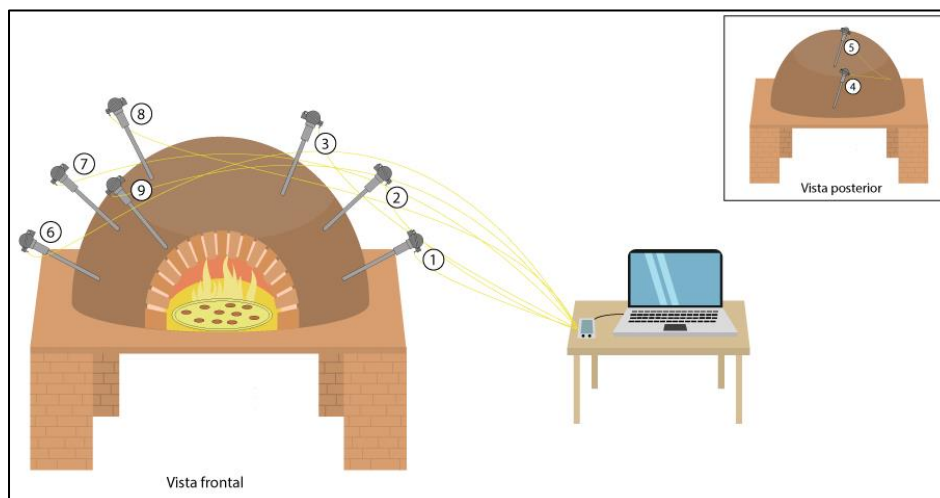


Figura 3. Vista frontal e vista posterior do forno, indicando a posição dos termopares utilizados na coleta dos dados de temperatura

As queimas foram realizadas até ser possível observar uma estabilidade térmica do forno em relação a quantidade de madeira inserida no forno. Para estas queimas, foram utilizados resíduos madeireiros de diferentes espécies com umidade média próxima aos 13%. O material utilizado não foi caracterizado, a fim de simular uma situação real onde diversos tipos de resíduos madeireiros são utilizados como combustível para aquecer fogões, fornos e fogueiras, em diferentes tipos de comunidades e situações específicas. Os dados coletados foram analisados através do uso de estatística descritiva e foram apresentados graficamente com o objetivo de verificar o comportamento da temperatura nos diferentes pontos durante todo o processo de combustão da madeira no forno.

3.3. Resultados e Discussão

3.3.1. Forno comercial

As temperaturas coletadas no forno comercial da pizzaria são apresentadas na Figura 4. É possível observar que as maiores temperaturas do forno são encontradas no Ponto 1, local onde se encontra a madeira no forno. Já as menores temperaturas são encontradas no Ponto 4, local oposto onde se concentra a madeira no forno, e também principal local onde ocorre as cocções das pizzas. De acordo com os gráficos, é possível observar que a dinâmica de distribuição de calor dentro do forno ocorre através da cúpula, com a irradiação do calor ocorrendo de baixo para cima, inicialmente, e seguindo a direção contrária (de cima para baixo) no outro lado do forno.

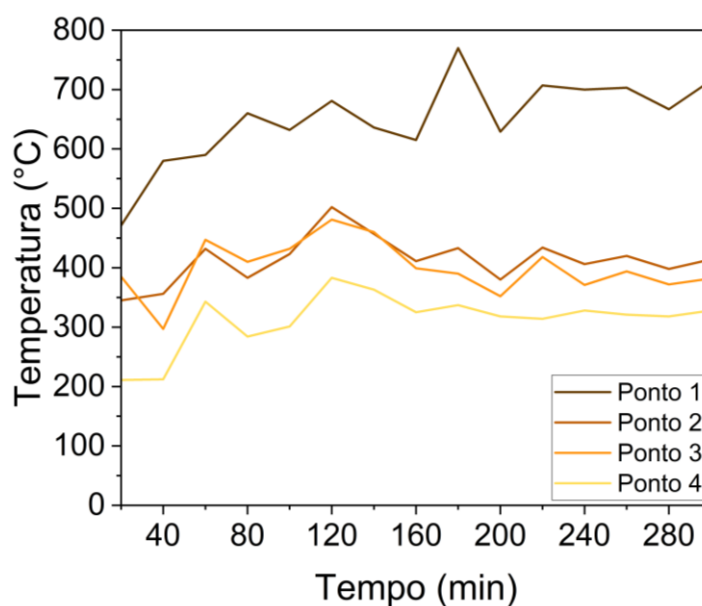


Figura 4. Temperaturas coletadas no forno comercial

Estas informações sobre a dinâmica de distribuição de calor e perfil térmico de fornos de cocção de alimentos, como os fornos de pizzaria, são de grande importância para a realização de possíveis alterações no forno que tornem o processo ainda mais eficiente, do ponto de vista energético. Quando são avaliadas as temperaturas dos pontos em relação aos diferentes intervalos de tempo de coleta (Figura 4), é possível observar que a temperatura no Ponto 1 varia de maneira autônoma, quando comparado com as temperaturas dos outros pontos, essa variação se dá

pelo abastecimento de lenha, que é realizado de maneira gradativa durante o processo, ou seja, quando há necessidade de aumentar ou manter determinada temperatura. Já as temperaturas T2 e T3 (Ponto 2 e Ponto 3, respectivamente) variam de maneira convergente. É válido destacar que no estabelecimento comercial estudado, como em muitos outros, o controle de temperatura é completamente empírico, não contando com a presença de termômetros ou outros equipamentos para a aferição da temperatura. Assim, os funcionários que controlam o processo de cocção de pizzas também são responsáveis indiretos por controlarem a lenha que entra no forno, definindo os intervalos de utilização de acordo com as características da lenha (umidade e diâmetro das peças) e de acordo com a necessidade de aumentar ou manter a temperatura.

De acordo com (Buonanno et al. 2010), durante a queima da lenha a temperatura no interior do forno de pizzas varia entre 300 e 768 °C, nas análises realizadas neste trabalho, foram encontradas temperaturas semelhantes. A temperatura ideal para a cocção das pizzas no interior do forno pode variar de acordo com diversos fatores, dependendo do modelo empregado na construção do forno, como as dimensões da cúpula, as propriedades refratárias do lastro, que permitem uma boa retenção de calor, entre outros (Buonanno et al. 2010). Estes fatores também podem influenciar a emissão de poluentes durante a queima da lenha. Caso o espaço seja mal dimensionado na relação porta do forno X largura da abertura da chaminé, pode ocorrer maior liberação gases poluentes e materiais particulados para o ambiente interno das pizzarias, o que pode prejudicar a qualidade do ar no interior dos estabelecimentos comerciais (Buonanno et al. 2010; Wang et al. 2018).

No caso do forno comercial avaliado neste estudo, foi observado que há uma alta produção de pizzas durante a semana, com média de produção entre 600 e 800 pizzas por semana. Esta alta produção de pizzas, bem como o tempo que a pizzaria permanece aberta durante o dia, influencia diretamente no consumo de lenha do estabelecimento. Neste caso específico, o forno é ligado às 16 h, no entanto, as primeiras pizzas passam pelo processo de cocção a partir das 18 h, ou seja, 2 h é o tempo de aquecimento do forno, de acordo com os conhecimentos empíricos do pizzaiolo. O forno permanece em operação até às 23 h durante a semana e até às 00 h durante o final de semana. Totalizando, em média, 7 h de funcionamento durante a semana e 8 h de funcionamento durante o final de semana. O tempo de cocção de cada pizza é de, aproximadamente, 90 segundos, para isso, de acordo com o pizzaiolo, o forno deve estar com altas temperaturas no seu interior. Esta “alta temperatura”, de acordo com as medições realizadas, é alcançada quando o Ponto 4, local onde ocorre a cocção, atinge temperaturas superiores a 300 °C, se estabilizando nesta faixa.

O consumo diário de madeira varia de acordo com o dia da semana, com um maior gasto sendo observado nos finais de semana, em relação aos outros dias. Este maior consumo se deve ao maior fluxo de pizzas que passam pela cocção no respectivo dia, haja visto que, quanto maior a quantidade de pizzas, maior é a quantidade de lenha necessária para manter o forno sempre numa temperatura alta e constante, garantindo a rapidez no processo de cocção. Estas questões energéticas estão relacionadas especificamente à madeira, suas propriedades e o seu poder calorífico intrínseco (Protásio et al. 2020). O poder calorífico, junto com a densidade da madeira, são responsáveis pela quantificação da densidade energética do material, ou seja, definem a quantidade de energia disponível em cada m³ de biomassa utilizada (Souza et al. 2022).

Por não possuírem conhecimento técnico necessário, os donos de pizzarias e outros estabelecimentos comerciais que utilizam a madeira como combustível acabam comprando o material sem saber sobre a sua procedência e qualidade. Questões como o tipo de espécie comercializada, entre outros aspectos, podem influenciar no volume de madeira utilizado, caso sejam utilizadas madeiras de maior ou menor densidade. No estabelecimento avaliado, o consumo médio de madeira por mês é de 6 m³. Considerando uma densidade média (500 kg.m⁻³), comum

às espécies do gênero *Eucalyptus*, que são tradicionalmente utilizadas nestes estabelecimentos, o gasto aproximado é de 3 toneladas de madeira por mês, para a produção de cerca de 3.000 pizzas no mês, ou seja, 1000 pizzas por tonelada de madeira queimada. É válido reforçar que, em caso de alta demanda no estabelecimento, um segundo forno, com as mesmas características, é acionado, para garantir a entrega de todos os pedidos. Todas estas informações são de grande importância para o estabelecimento de técnicas operacionais para aplicação no forno experimental testado neste trabalho.

3.3.2. Cura e utilização do forno experimental para cocção de pizzas

Na Figura 5 são apresentadas as coletas de temperaturas do forno experimental, realizadas nas primeiras queimas, durante o processo de cura da estrutura. Para a realização do processo de cura do forno experimental utilizado para cocção de alimentos, são necessárias algumas queimas. Estas queimas, ocorrem, inicialmente, em temperaturas mais brandas, com a madeira concentrada no centro do forno, diferente do processo de cocção tradicional, onde a madeira fica concentrada em uma das laterais do forno e próxima à cúpula. Na primeira queima do forno experimental, foram utilizados resíduos madeireiros de diferentes espécies, com uma duração total de queima de 10 horas, mantendo a chama acesa, sem permitir a formação de grandes chamas que pudessem danificar a estrutura do forno neste primeiro contato com o forno. As informações de temperatura desta primeira queima não foram coletadas, pois devido questões de acabamentos do forno não foi possível realizar a instalação dos equipamentos de controle de temperatura nos locais adequados a tempo, haja visto o tempo necessário entre a finalização do forno e a primeira queima.

É válido salientar, também, que as primeiras queimas realizadas no forno foram realizadas com resíduos madeireiros de diferentes espécies. Esta variação nas espécies pode representar variação nos seus atributos energéticos, como poder calorífico superior e densidade energética (Protásio et al. 2020; Souza et al. 2022). Por isso, o controle de temperatura foi realizado de acordo com a quantidade de lenha inserida por vez.

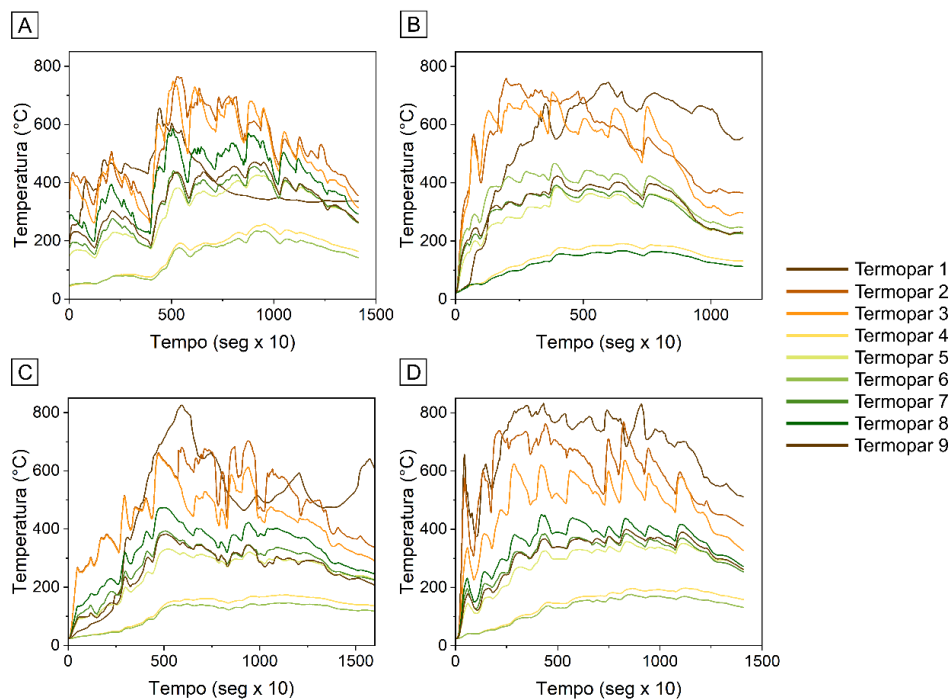


Figura 5. Queimas realizadas no forno experimental

É possível observar que na primeira queima registrada (Figura 5 - A) a combustão ocorreu de maneira mais lenta e gradual e, mesmo após este período inicial, a temperatura se manteve mais baixa e menos estável em altas temperaturas. A partir da primeira queima registrada, o fogo foi concentrado na lateral do forno, no entanto, nenhum alimento foi inserido, haja visto que a temperatura utilizada ainda não era a ideal para a realização da cocção de alimentos, pois o processo ocorreu em temperaturas abaixo dos 700 °C na cúpula do forno, durante a maior parte do tempo. A partir da segunda queima registrada (Figura 5 - B), o forno já alcançou altas temperaturas em um menor intervalo de tempo. Provavelmente, isto ocorreu porque a liberação de boa parte da umidade presente na estrutura foi liberada em queimas anteriores, possibilitando, assim, uma maior retenção de calor no forno desde os primeiros momentos de aquecimento.

A partir da terceira queima, como o forno passou a atingir temperaturas mais altas, os alimentos passaram a ser utilizados e a cocção passou a ser realizada no forno experimental, haja visto a necessidade destas temperaturas mais altas para que a cocção possa ocorrer de maneira adequada (Buonanno et al. 2010). Com a união dos conhecimentos empíricos com os equipamentos utilizados na experimentação do forno, foram definidos uma temperatura e um tempo de cocção para cada pizza. Foi observado que, assim como no forno comercial estudado, no forno experimental a cocção de cada pizza tinha duração média de 90 segundos. Esta informação é de grande importância, tanto para o planejamento da dinâmica do estabelecimento comercial, quanto para informações precisas sobre o tempo necessário para realizar a cocção de outras massas ou outros alimentos em fornos comunitários que possam ser instalados em pequenas comunidades.

Esta rapidez na cura do forno pode estar relacionada com os materiais utilizados e com o clima do local no período da construção e do início dos testes. Como o forno foi construído no mês de Maio, período relativamente seco e com poucas chuvas, facilitou a perda de água pela estrutura do forno, que contém grandes quantidades de cimento e concreto armado em sua composição, haja visto que a temperatura é uma das principais variáveis relacionadas ao processo de cura do concreto (Wang et al. 2022; Yu et al. 2023). Além disso, o processo de

queima de maneira mais branda, além de secar a estrutura e realizar a cura mais rápido, fazendo a água evaporar, promoveu a dilatação e ajuste da estrutura, o tornando resistente à maiores temperaturas que suportou sem problemas nas queimas futuras (Yu et al. 2023). De maneira prática, esta primeira queima, ou “cura final” foi importante para acelerar o processo, garantindo uma ótima resistência à estrutura em um menor intervalo de tempo, pontos positivos para a eficiência de uma construção (Wang et al. 2022). Ao todo, da construção até a utilização para a primeira cocção de alimentos, foram 20 dias, com 5 dias para a construção e 15 dias de secagem natural da estrutura. Após este período, o forno já se encontrou apto para a realização da queima para a cura final.

Esta informação é importante, especialmente, para o planejamento de ações por parte dos tomadores de decisão do setor público ou privado, que podem, assim, planejar a implementação destes fornos nestas comunidades e realizar treinamentos e outras atividades de conscientização durante o período de preparação do forno. Após este período, cada comunidade pode se sentir livre para explorar o processo de cocção de diversos alimentos, com diferentes tipos de madeiras, adaptados à sua realidade própria. Da mesma forma, pequenos estabelecimentos comerciais podem adaptar a quantidade de madeira utilizada e o tempo de operação do forno à sua realidade, visando maximizar a economia de madeira e otimizar o tempo de cocção das pizzas ou outras massas.

3.3.3. Benefícios diretos e indiretos da instalação de um forno de alvenaria para a cocção de alimentos

De maneira geral, a queima da madeira gera uma grande quantidade de poluentes no ar, os que apresentam maiores quantidades são os materiais particulados (PMs), produtos químicos orgânicos voláteis (benzeno, formaldeído, entre outros), dióxido de enxofre (SO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x) (Russell 2013). Na Europa, por exemplo, a utilização da lenha no setor energético vem crescendo nos últimos anos, este crescimento ocorre, principalmente, devido à preocupação global em relação às mudanças climáticas e a busca constante por fontes de energia que sejam ambientalmente adequadas e economicamente viáveis, haja visto os diversos impactos financeiros causados pelos problemas globais mais recentes (Cincinelli et al. 2019). Assim, boa parte dos elementos químicos que são liberados em formato gasoso entram em contato direto com diversas pessoas no interior de suas residências, através da exposição prolongada à esta fumaça. Em todo o mundo, a quantidade de pessoas expostas à poluição do ar no interior de suas residências é enorme e boa parte destas pessoas está concentrada em locais e comunidades com pouco acesso aos recursos financeiros, o que limita a solução do problema (WHO 2017). Assim, a utilização de equipamentos de baixa eficiência e biomassas que não possuem qualidades energéticas acabam comprometendo significativamente a qualidade do ar nestas residências que utilizam a biomassa com frequência (WHO 2010, 2021).

Diversos estudos já realizados demonstram a contribuição negativa para a qualidade do ar dos equipamentos de queima que utilizam a biomassa como combustível para cocção no interior das residências (Vicente and Alves 2018). Estes poluentes, além de causarem impactos ambientais, afetam diretamente a saúde das pessoas que residem nestas residências. Dentre os diversos poluentes conhecidos, um dos mais associados com problemas de saúde são os materiais particulados, que podem afetar a saúde humana em diferentes níveis e de diferentes formas, que variam desde inflamações relativamente simples na garganta, até mesmo problemas sistêmicos em maior escala (WHO 2017; Vicente and Alves 2018). Além dos impactos diretos do material particulado, ainda existem riscos associados, como os riscos de câncer com os metais pesados que podem estar associados à estas partículas (Vicente

et al. 2020). De acordo com a Organização Mundial da Saúde, a poluição no interior das residências causadas pela cocção de alimentos foi responsável por cerca de 3.2 milhões de mortes prematuras por ano, em 2020 (WHO 2021).

Além dos impactos diretos à saúde humana, existem os impactos ambientais que, apesar de não serem diretos, acabam retornando aos humanos através dos impactos causados pelas mudanças climáticas (Jones 2022). A queima da biomassa libera, entre outros elementos, efluentes gasosos que são causadores do efeito estufa, como CO₂, CH₄ e NO_x, além disso, quando a queima é realizada em equipamentos de baixa eficiência, ocorre a liberação excessiva de CO e Material Particulado, também causadores de diversos problemas ambientais (Simoneit 2002; Oluwoye et al. 2020; Tong et al. 2020). Estes impactos afetam o clima a nível global, por isso que são de interesse de diferentes países ao redor do mundo que se reúnem com frequência para tratar sobre estas questões e discutir estratégias que possam reduzir os impactos destas mudanças no clima.

Apesar do grande problema e do impacto positivo que ações conjuntas poderiam representar nestas comunidades que sofrem com a poluição do ar no interior das suas residências e no mundo, de maneira geral, pouco foi feito ao longo dos anos (WHO 2017). Assim, novas iniciativas que busquem a resolução parcial ou total do problema, ou que pelo menos mitigue os problemas em pequenas comunidades, são bem-vistas e devem ser valorizadas nos próximos anos. As iniciativas como as da Clean Cooking Alliance (Clean Cooking Alliance 2022) devem ser expandidas e adaptadas às realidades das diferentes comunidades ao redor do mundo, levando em consideração as particularidades de cada comunidade, disponibilidade de combustíveis nestas regiões e, principalmente, adaptabilidade da comunidade ao uso de novas tecnologias, afinal, além da implementação, deve-se ensiná-los boas práticas de utilização e de escolha da madeira, buscando a melhoria de vida dessas populações através de diferentes aspectos.

Os efeitos positivos de se utilizar a biomassa como combustível, principalmente onde as comunidades já fazem o uso tradicional desse material, podem ser observados pelo interesse de diferentes países ao redor do mundo em reduzir o uso de combustíveis fósseis. Um bom equipamento de queima, quando utilizado de maneira correta e com biomassa de qualidade, pode contribuir de maneira positiva para a disponibilidade de energia de pequenas comunidades de regiões de difícil acesso, como na região Norte do Brasil (Protásio et al. 2021). Atualmente, alguns estudos no Brasil já demonstram a importância da caracterização e classificação da biomassa utilizada para energia nestas comunidades, demonstrando a viabilidade de utilização de resíduos florestais para a produção de carvão para uso doméstico (Lima et al. 2020, 2021). A partir da inserção de fornos de cocção de alimentos, como o desse trabalho, nestas comunidades, outros estudos podem ser conduzidos com o objetivo de avaliar a utilização desses resíduos florestais para a queima direta na cocção de alimentos. Outras estratégias possíveis de serem estudadas é a inclusão de outros resíduos madeireiros, como os da arborização urbana, que já foram testados na produção de carvão, para serem testados na queima direta em fornos de cocção de alimentos (Meira et al. 2021).

De fato, a utilização de resíduos florestais madeireiros, ou de madeira de florestas plantadas, pode contribuir de maneira significativa para a exploração excessiva de algumas espécies, bem como podem evitar a exploração desenfreada de madeiras oriundas de florestas nativas, como é o caso das florestas tropicais (Brancalion et al. 2018). Essa redução da exploração de florestas nativas é importante para garantir a redução dos impactos relacionados à mudança no uso do solo e às mudanças climáticas. Haja visto que, em comunidades com baixo acesso aos recursos naturais, os responsáveis por cada residência realizam a colheita da sua própria madeira para realizar as cocções nas suas residências.

A utilização de um único forno compartilhado entre alguns moradores destas comunidades pode diminuir o uso de combustível (madeira), tanto pela melhor eficiência do equipamento de queima, quanto pelo tamanho do

forno, que permite a cocção de diferentes tipos de alimentos de maneira simultânea, com diferentes temperaturas máximas sendo observadas em diferentes pontos do forno. Com o correto treinamento dos moradores destas comunidades, é possível padronizar tempos e pontos de cocção diferentes ao longo do lastro do forno, o que pode facilitar a preparação de diferentes tipos alimentos simultaneamente, resultando na otimização de tempo de uso do forno e, conseqüentemente, redução do uso da madeira.

Esta redução do uso da madeira, além de resultar em benefícios ecológicos, influencia diretamente na renda familiar dos moradores destas comunidades, haja visto que parte da lenha utilizada para a cocção de alimentos também é comprada e não só adquirida através da extração. Este impacto financeiro é de grande importância, principalmente por saber que boa parte das populações que utilizam a lenha como combustível para a preparação dos seus alimentos vive em situação precária, financeiramente (WHO 2010). Com a possibilidade de união entre diferentes moradores, poderia ocorrer uma compra unificada de madeira ou uma coleta conjunta de resíduos madeireiros, haja visto que a cocção dos alimentos também pode ocorrer de maneira conjunta entre a comunidade. Além dos impactos ambientais e financeiros, uma das maiores melhorias que o forno de cocção de alimentos pode trazer diretamente às comunidades, especialmente naquelas com maior fragilidade social, onde os alimentos ainda são preparados em equipamentos de queima com baixa eficiência e com alta liberação de efluentes gasosos, é a melhoria na qualidade do ar no interior das residências. Estas melhorias podem impactar diretamente na redução dos problemas de saúde que estão associados com a baixa qualidade do ar no interior das residências ou em locais próximos, devido ao uso de equipamentos precários e com pouca tecnologia.

Com isso, o poder público também é impactado indiretamente, visto que estas famílias terão o risco de problemas relacionados à fumaça da biomassa reduzido, com a baixa exposição causada pelo forno de alvenaria de grande escala. Sendo assim, a busca aos sistemas de saúde será reduzida, de maneira gradual, especificamente por pessoas que sofrem pelos principais problemas que estão relacionadas à alta exposição a fumaça da biomassa nessas populações. Conseqüentemente, a adoção de estratégias como estas, resultarão em melhorias da qualidade de vida dessas populações, tanto pelo maior contato entre comunidade, o que permitirá a inserção de outras políticas públicas assistencialistas à essas populações, quanto pelo impacto financeiro na renda destas famílias, que poderão adotar outras estratégias financeiras para melhorar a sua vida (WHO 2017).

Aqui no Brasil, especialmente em áreas da região Norte e Nordeste, as populações ainda dependem fortemente do uso da madeira como combustível para a cocção dos seus alimentos. Boa parte dessa população ainda dependente quase que exclusivamente da madeira vive em situação de fragilidade social, necessitando de políticas públicas fortes e eficientes para poder realizar até mesmo as atividades mais simples do seu dia, como a preparação de alimentos. Mas esta realidade não é restrita ao Brasil, pois outros diversos países em desenvolvimento utilizam a biomassa ou outras fontes “não limpas” como combustível para a cocção de alimentos, especialmente no continente Africano e no continente Asiático (WHO 2017). Assim, a implementação dessas estratégias poderá possibilitar diversos benefícios às comunidades ao redor do mundo, haja visto as necessidades, já discutidas anteriormente, enfrentadas por estas populações.

3.3.4. Aplicações práticas e pesquisas futuras

As questões discutidas neste trabalho são de total interesse para diversos órgãos locais e mundiais que trabalham diretamente com questões sobre a segurança alimentar, melhoria da qualidade de vida de famílias em situação de fragilidade social e redução dos impactos das mudanças climáticas. Assim, estes aspectos vão diretamente

ao encontro de alguns dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas (United Nations 2015).

De maneira mais específica, estes pontos estão relacionados aos objetivos 3 (Saúde e bem-estar), haja visto os impactos positivos à saúde humana com a melhoria da qualidade do ar no interior das residências, através da transferência/retirada de uma das principais fontes poluidoras nestes locais; 7 (Energia limpa e acessível), através da melhoria da qualidade dos sistemas de queima de biomassa para geração de energia, reduzindo a necessidade da utilização de combustíveis fósseis, utilizando combustíveis de origem renovável, e contribuindo para a redução de efluentes gasosos através de tecnologias modernas de combustão; 11 (Cidades e comunidades sustentáveis), aumentando a integração entre pequenas comunidades, colaborando para um aumento na sustentabilidade dessas comunidades, reduzindo o consumo irracional de madeira, através de sistemas de queima mais eficientes e com baixo consumo de combustível, e reduzindo diversos problemas da comunidade relacionados à baixa qualidade do ar no interior das residências; e 13 (Ação contra a mudança global do clima), reduzindo o consumo de combustíveis fósseis e melhorando a qualidade do ar através da redução da emissão de efluentes gasosos de fontes poluidoras, conscientizando sobre o melhor uso da biomassa como combustível e sobre equipamentos de queimas eficientes e as boas práticas de utilização, a fim de garantir o cumprimento de todos os outros objetivos citados anteriormente.

Estudos futuros devem focar nas características dos combustíveis utilizados nestes fornos e como estas características podem contribuir de maneira positiva para a redução da emissão de efluentes gasosos durante o processo de cocção. Além disso, análises em relação a melhorias na estrutura física dos fornos também devem ser desenvolvidas, com o objetivo de aprimorar, ainda mais, a efetividade da combustão que ocorre no interior do forno e a distribuição de calor de maneira eficiente e homogênea, garantindo uma cocção de qualidade, com economia de combustível e baixa emissão de efluentes gasosos nocivos.

Com a avaliação destes aspectos em pesquisas futuras, estudos de viabilidade econômica podem ser realizados, posteriormente, para que tomadores de decisão ao redor do mundo, sejam eles atuantes em esferas públicas ou privadas, possam disseminar esta tecnologia e colaborar efetivamente com o desenvolvimento de pequenas comunidades. Para além de pequenas comunidades isoladas que podem se beneficiar desta tecnologia, é importante destacar o espaço de pequenos comerciantes que trabalham com a produção de pizzas e outras massas e que fazem uso de combustíveis fósseis (gás liquefeito de petróleo) e podem ter uma economia significativa com a mudança do sistema de cocção, promovendo benefícios financeiros e socioambientais para estes grupos.

3.4. Conclusões

Com as informações discutidas neste trabalho, é possível concluir que, do ponto de vista técnico, a construção de fornos de alvenaria em pequenas comunidades é viável e pode gerar um impacto significativo na qualidade do ar no interior das residências de famílias que utilizam madeira para a cocção dos alimentos, haja visto a retirada da fonte poluidora do interior das residências. Além disso, devido a sua alta produção e baixo consumo de lenha, o forno também pode ser utilizado para pequenos comerciantes que trabalham com a produção de pizzas e outras massas. O processo de produção é relativamente simples e rápido, o processo de cura até os primeiros usos também é relativamente rápido e o processo de cura com calor é fundamental para garantir a boa estrutura do concreto em um menor espaço de tempo, o que acelera a utilização dos fornos por parte dos usuários.

Estudos futuros devem focar na qualidade da madeira (ou resíduos madeireiros) a serem utilizados nestes fornos, visando uma maior economia de combustível e menor emissão de efluentes gasosos durante as queimas.

Além disso, pesquisas que busquem a melhoria do forno, com melhores dimensionamentos da estrutura, também são indicadas. Por fim, pensando na implementação de políticas públicas efetivas, o estudo da viabilidade econômica destes fornos é imprescindível para garantir a sua aplicabilidade em diferentes comunidades ao redor do mundo.

Referências

- Brançalion PHS, De Almeida DRA, Vidal E, Molin PG, Sontag VE, Souza SEXF, Schulze MD (2018) Fake legal logging in the Brazilian Amazon. *Sci Adv* 4:eaat1192. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat1192>
- Buonanno G, Morawska L, Stabile L, Viola A (2010) Exposure to particle number, surface area and PM concentrations in pizzerias. *Atmos Environ* 44:3963–3969. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.07.002>
- Carmo Moreira MA, Barbosa MA, Jardim JR, Queiroz MCCAM, Inácio LU (2013) Chronic obstructive pulmonary disease in women exposed to wood stove smoke. *Rev da Assoc Médica Bras (English Ed)* 59:607–613. [https://doi.org/10.1016/S2255-4823\(13\)70527-7](https://doi.org/10.1016/S2255-4823(13)70527-7)
- Cincinelli A, Guerranti C, Martellini T, Scodellini R (2019) Residential wood combustion and its impact on urban air quality in Europe. *Curr. Opin. Environ. Sci. Heal.* 8:10–14
- Clean Cooking Alliance (2022) Clean Cooking Alliance. <https://cleancooking.org/>. Accessed 20 Dec 2022
- da Silva LFF, Saldiva SRDM, Saldiva PHN, Dolnikoff M (2012) Impaired lung function in individuals chronically exposed to biomass combustion. *Environ Res* 112:111–117. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2011.10.012>
- Deng Y, Gao Q, Yang D, Hua H, Wang N, Ou F, Liu R, Wu B, Liu Y (2020) Association between biomass fuel use and risk of hypertension among Chinese older people: A cohort study. *Environ Int* 138:105620. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105620>
- Gordon SB, Bruce NG, Grigg J, Hibberd PL, Kurmi OP, Lam K bong H, Mortimer K, Asante KP, Balakrishnan K, Balmes J, et al (2014) Respiratory risks from household air pollution in low and middle income countries. *Lancet Respir. Med.* 2:823–860
- Jain T, Sheth PN (2019) Design of energy utilization test for a biomass cook stove: Formulation of an optimum air flow recipe. *Energy* 166:1097–1105. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.180>
- Jones A (2022) The health impacts of climate change: why climate action is essential to protect health. *Orthop Trauma* 36:248–255. <https://doi.org/10.1016/j.mporth.2022.07.001>
- Kirch T, Birzer CH, van Eyk PJ, Medwell PR (2018) Influence of Primary and Secondary Air Supply on Gaseous Emissions from a Small-Scale Staged Solid Biomass Fuel Combustor. *Energy & Fuels* 32:4212–4220. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03152>
- Lima MDR, Patrício EPS, Barros Junior U de O, Silva R de CC, Bufalino L, Numazawa S, Hein PRG, Protásio T de P (2021) Colorimetry as a criterion for segregation of logging wastes from sustainable forest management in the Brazilian Amazon for bioenergy. *Renew Energy* 163:792–806. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.078>
- Lima MDR, Simetti R, Assis MR de, Trugilho PF, Carneiro A de CO, Bufalino L, Hein PRG, Protásio T de P (2020) Charcoal of logging wastes from sustainable forest management for industrial and domestic uses in the Brazilian Amazonia. *Biomass and Bioenergy* 142:105804. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105804>
- Meira AM, Nolasco AM, Klingenberg D, Souza EC, Dias Júnior AF (2021) Insights into the reuse of urban forestry wood waste for charcoal production. *Clean Technol Environ Policy*. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02181-1>
- Oluwoye I, Altarawneh M, Gore J, Dlugogorski BZ (2020) Products of incomplete combustion from biomass reburning. *Fuel* 274:117805. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117805>

- Protásio T de P, Roque Lima MD, Scatolino MV, Silva AB, Rodrigues de Figueiredo IC, Gherardi Hein PR, Trugilho PF (2021) Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of Eucalyptus clones from Brazilian energy forests. *Renew Energy* 164:34–45. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.057>
- Protásio T de P, Scatolino MV, Lima MDR, de Araújo ACC, de Figueiredo ICR, Bufalino L, Hein PRG, Trugilho PF (2020) Insights in quantitative indexes for better grouping and classification of Eucalyptus clones used in combustion and energy cogeneration processes in Brazil. *Biomass and Bioenergy* 143:. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105835>
- Russell A (Ted) (2013) COMBUSTION EMISSIONS. In: Straif K, Cohen A, Samet J (eds) *Air Pollution and Cancer*. IARC Scientific Publication
- Sana A, Meda N, Badoum G, Kafando B, Bouland C (2019) Primary Cooking Fuel Choice and Respiratory Health Outcomes among Women in Charge of Household Cooking in Ouagadougou, Burkina Faso: Cross-Sectional Study. *Int J Environ Res Public Health* 16:1040. <https://doi.org/10.3390/ijerph16061040>
- Simoneit BR. (2002) Biomass burning — a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion. *Appl Geochemistry* 17:129–162. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(01\)00061-0](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00061-0)
- Souza EC de, Gomes JPS, Pimenta AS, de Azevedo TKB, Pereira AKS, Gomes RM, Brito JO, Dias Júnior AF (2022) Briquette production as a sustainable alternative for waste management in the tannin extraction industry. *Environ Sci Pollut Res*. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23490-y>
- Tong S, Kong L, Yang K, Shen J, Chen L, Jin S, Wang C, Sha F, Wang L (2020) Characteristics of air pollution episodes influenced by biomass burning pollution in Shanghai, China. *Atmos Environ* 238:117756. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117756>
- United Nations (2015) Agenda of Sustainable Development Goals 2030. <https://sdgs.un.org/goals>. Accessed 17 Sep 2021
- Vicente ED, Alves CA (2018) An overview of particulate emissions from residential biomass combustion. *Atmos Res*. 199:159–185
- Vicente ED, Vicente AM, Evtuygina M, Oduber FI, Amato F, Querol X, Alves C (2020) Impact of wood combustion on indoor air quality. *Sci Total Environ* 705:135769. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135769>
- Wang J, Long G, Xiang Y, Dong R, Tang Z, Xiao Q, Yang Z, Ma K (2022) Influence of rapid curing methods on concrete microstructure and properties: A review. *Case Stud Constr Mater* 17:e01600. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01600>
- Wang L, Zheng X, Stevanovic S, Wu X, Xiang Z, Yu M, Liu J (2018) Characterization particulate matter from several Chinese cooking dishes and implications in health effects. *J Environ Sci* 72:98–106. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.12.015>
- WHO (2021) Household air pollution and health. <https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>. Accessed 22 Jun 2022
- WHO WHO (2017) *Burning Opportunity: Clean Household Energy for Health, Sustainable Development, and Wellbeing of Women and Children*. World Health Organization
- WHO WHO (2010) *WHO GUIDELINES FOR INDOOR AIR QUALITY*
- Yu K, Jia M, Yang Y, Liu Y (2023) A clean strategy of concrete curing in cold climate: Solar thermal energy storage based on phase change material. *Appl Energy* 331:120375. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120375>

4. RELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS TÉCNICOS DA LENHA E EMISSÕES GASOSAS NO PROCESSO DE COCÇÃO DE ALIMENTOS

Resumo

A redução da emissão de gases do efeito estufa é uma preocupação global. Assim, identificar as fontes de emissão e mitigar a atividade poluente são importantes em diferentes escalas. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar como a qualidade da lenha pode influenciar na emissão de efluentes gasosos durante o seu uso como combustível no processo de cocção de alimentos, considerando o caso específico do preparo de pizzas. Para isso, foram utilizadas as madeiras de 10 indivíduos de três diferentes espécies florestais (*Corymbia citriodora* Hill & Johnson; *Eucalyptus saligna* Sm.; *Eucalyptus globulus* Labill.). As madeiras foram caracterizadas fisicamente (umidade e densidade básica), quimicamente (composição química estrutural, análise química imediata e FT-IR) e energeticamente (poder calorífico superior, inferior e útil, TG/DTG). Foram realizados três processos de cocções para cada espécie combustível. As cocções foram divididas em três etapas distintas (aquecimento, cocção e resfriamento). O consumo médio de lenha, bem como o volume médio de lenha utilizado por fornada foi calculado. Foi determinado a concentração de diferentes efluentes gasosos na chaminé do forno (CO - ppm; NO - ppm; NO₂ - ppm; H₂S - ppm; CO₂ - %; CH₄ - %; NO_x - ppm) durante a queima das diferentes espécies. E outros efluentes gasosos tiveram as suas concentrações determinadas a partir da emissão próximo a porta do forno (CO, CO₂ e Materiais Particulados - PM₁₀ e PM_{2,5}). A espécie *E. saligna* apresentou menor consumo de lenha durante a cocção (19,3 Kg/cocção) e a espécie *C. citriodora* apresentou maior consumo de massa (33,8 Kg/cocção). A massa de madeira utilizada na cocção, bem como a densidade e o teor de holocelulose da madeira influenciaram de maneira mais significativa a emissão de todos os poluentes analisados, com exceção do material particulado, que indicou ser mais influenciado pela presença de extrativos na madeira. Estudos futuros devem focar na utilização de diferentes espécies com composições químicas diferentes, com o objetivo de criar e validar modelos matemáticos que possam prever com acurácia quais outros aspectos das propriedades da madeira estão relacionados com a emissão de efluentes gasosos nos fornos de pizza. Por último, se faz importante focar na criação de políticas públicas e normativas que estabeleçam padrões de qualidade do ar no interior e no exterior de estabelecimentos comerciais, principalmente buscando atingir os objetivos e compromissos ambientais definidos para os próximos anos.

Palavras-chave: Queima da madeira, fontes de energia renováveis, pizzarias, poluentes atmosféricos.

Abstract

Reducing greenhouse gas emissions is a global concern. Thus, identifying emission sources and mitigating polluting activity is essential at different scales. Thus, the objective of this work was to evaluate how firewood's quality can influence gaseous effluents' emission during its use as fuel in the food cooking process, considering the specific case of pizza preparation. For this, wood from 10 individuals of three different forest species (*Corymbia citriodora* Hill & Johnson; *Eucalyptus saligna* Sm.; *Eucalyptus globulus* Labill.) were used. The woods were characterized physically (moisture and basic density), chemically (structural chemical composition, immediate chemical analysis and FT-IR) and energetically (higher, lower and net calorific value, TG/DTG). Three cookings per species were performed. Cooking was divided into three steps (heating, cooking, and cooling). The average consumption of firewood and the average volume of firewood used per batch was calculated. The concentration of different gaseous effluents in the kiln chimney (CO - ppm; NO - ppm; NO₂ - ppm; H₂S - ppm; CO₂ - %; CH₄ - %; NO_x - ppm) during the firing of different species was determined. And other gaseous effluents had their concentrations determined from the emission near the oven door (CO, CO₂, and Particulate Materials - PM₁₀ and PM_{2,5}). The species *E. saligna* had the lowest firewood consumption during cooking (19.3 kg/cooking), and the species *C. citriodora* had the highest mass consumption (33.8 kg/cooking). The mass of wood used in cooking and the density and

holocellulose content of the wood more significantly influenced the emission of all pollutants analyzed, except particulate matter, which indicated to be more influenced by the presence of extractives in the wood. Future studies should focus on using different species with different chemical compositions, aiming to create and validate mathematical models that can accurately predict which other aspects of wood properties are related to the emission of gaseous effluents in pizza ovens. Finally, it is essential to focus on creating public policies and regulations that establish air quality standards inside and outside commercial establishments, mainly seeking to achieve the environmental goals and commitments defined for the coming years.

Keywords: Wood burning, renewable energy sources, pizzerias, atmospheric pollutants.

4.1. Introdução

As mudanças climáticas trouxeram diversos alertas sobre os meios de produção e consumo da humanidade, principalmente em relação aos efluentes (sólidos, líquidos e gasosos) liberados durante essas atividades. A madeira, que foi a primeira fonte de energia utilizada para aquecer e cozinhar, continua sendo uma alternativa energética para diversas populações ao redor do mundo. Especialmente por ser facilmente acessível, ter baixo custo e ser uma fonte renovável, a lenha ainda é usada em diversas culturas no preparo dos alimentos (Cereceda-Balic et al., 2017). Junto com resíduos agrícolas, fezes animais, carvão mineral e querosene, a lenha é consumida, hoje em dia, por cerca de 2,6 bilhões de pessoas (WHO, 2021). Apesar de ter uma grande importância no cenário global de produção de alimentos, poucos estudos buscaram avaliar como a qualidade da lenha pode impactar nas emissões de efluentes gasosos durante o processo de cocção de alimentos (Lima et al., 2020). Estudos como esses são importantes, principalmente, devido ao grande uso da biomassa como fonte de combustível em residências e em estabelecimentos comerciais, haja visto que humanos comumente passam entre 80 e 90% do seu tempo nestes ambientes internos (Ielpo et al., 2020; Lima et al., 2020).

Nos países em desenvolvimento, estima-se que a biomassa é responsável por suprir cerca de 40% do consumo energético primário (Jain and Sheth, 2019). No Brasil, a lenha e o carvão vegetal representaram 8,9% da Oferta de Energia Interna no ano de 2020 (Empresa de Pesquisa Energética, 2021). Boa parte da lenha que é utilizada para energia, é consumida por estabelecimentos comerciais como padarias, pizzarias e restaurantes (Empresa de Pesquisa Energética, 2021; Lima et al., 2020). Apesar de existirem alguns estudos que avaliam o impacto da emissão de poluentes de pizzarias e restaurantes, pouco se sabe sobre a influência das características do combustível (lenha) na emissão gasosa durante a cocção dos alimentos (Buonanno et al., 2010; Falciano et al., 2022; Ielpo et al., 2020; Kumar et al., 2016; Lima et al., 2020). Assim, este estudo se destaca pelo seu ineditismo em analisar as principais características de lenhas de três diferentes tipos de madeira utilizadas como combustíveis nos fornos de pizzarias para, assim, compreender a relação entre estas diferentes características e as emissões de diferentes efluentes gasosos que são apontados como causadores de problemas de saúde e problemas ambientais. Com o conhecimento destas relações, será possível definir, futuramente, estratégias de mitigação das emissões de efluentes gasosos potencialmente nocivos e através da escolha de espécies que possuam características mais adequadas para a queima neste tipo de forno e, assim, manter e ampliar a utilização da lenha, que é um combustível renovável, abundante e disponível em diferentes locais ao redor do mundo, o que facilita a sua utilização por diversos setores da sociedade.

Além de todos os problemas ambientais relacionados à fumaça da biomassa, um outro problema é a relação entre a qualidade do ar e os problemas de saúde enfrentados pelos indivíduos com exposição direta ou indireta aos efluentes emitidos durante a queima deste combustível. Em relação aos problemas ambientais, podemos

destacar a emissão dos principais elementos causadores do efeito estufa, como CO₂, CH₄ e N₂O, além da produção de fumaças densas que podem causar problemas locais e até regionais (Tong et al., 2020; J. Wang et al., 2018; Yin et al., 2019). Estes elementos atuam de maneira individual, ou em conjunto com outras fontes poluentes, na poluição e diminuição da qualidade do ar, gerando problemas ambientais que podem impactar até mesmo no ciclo biogeoquímico de diferentes ecossistemas (Mahowald, 2011; Talib and Randhir, 2017; Tong et al., 2020). Já em relação aos problemas de saúde ligados à baixa qualidade do ar causada pela fumaça da queima da biomassa, é possível destacar doenças oculares, a doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC), asma e outras doenças pulmonares inflamatórias crônicas, principalmente quando ocorre exposição prolongada em ambientes fechados ou com pouca ventilação (Falfán-Valencia et al., 2020; Jaiswal et al., 2022; Ramírez-Venegas et al., 2018).

Sabendo da importância da investigação dos aspectos relacionados à emissão de efluentes gasosos durante a queima da biomassa, especialmente em ambientes comerciais, a nossa hipótese é que as diferentes características da biomassa podem influenciar na presença e na intensidade de compostos nocivos liberados nos efluentes gasosos emitidos durante a combustão da lenha. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar como a qualidade da lenha pode influenciar na emissão de efluentes gasosos durante o seu uso como combustível no processo de cocção de alimentos, considerando o caso específico do preparo de pizzas.

4.2. Material e Métodos

4.2.1. Coleta e preparo da lenha

Para a realização deste estudo, foram coletadas as madeiras de 10 indivíduos de três diferentes espécies florestais, sendo elas: *Corymbia citriodora* Hill & Johnson, *Eucalyptus saligna* Sm. e *Eucalyptus globulus* Labill. Os indivíduos abatidos possuíam entre 6 e 8 anos de idade, eram de origem seminal e possuíam diâmetro médio variando entre 5 e 15 cm. O material foi coletado na cidade de Jerônimo Monteiro, ES (39° 38' longitude Oeste e 21°19' latitude Sul), o clima da região é classificado como “Cwa”, de acordo com a classificação de Köppen, com temperatura média anual igual a 23,1 °C e precipitação total média igual a 1341 mm (Lima et al., 2008).

As madeiras foram seccionadas em toretes de, aproximadamente, 1 m de comprimento em diferentes posições ao longo da árvore e, em seguida, foram transportadas e empilhadas em local próximo ao forno de alvenaria, onde permaneceram secando ao ar livre durante um período de 3 meses. Foram retirados discos a 1,30 m de altura da base para a realização de análises laboratoriais de caracterização da madeira.

4.2.2. Caracterização física das madeiras

A umidade da madeira, em base úmida, foi determinada em dois momentos. A primeira determinação ocorreu logo após a coleta da madeira e separação dos discos, onde 10 discos de cada espécie foram selecionados aleatoriamente, foram pesados e, em seguida, foram inseridos em uma estufa de circulação forçada, à 103 ± 2 °C, até atingirem uma massa constante. Após isso, os valores de umidade foram calculados utilizando a Equação 1:

$$\%U = \left(\frac{P_{mu} - P_{ms}}{P_{mu}} \right) \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

Onde: %U= umidade da madeira, em base úmida (%); Pmu= massa da madeira úmida (g); Pms= massa da madeira seca (g).

Para a determinação da densidade básica, os discos de cada espécie foram transformados em cunhas e foram selecionadas 10 cunhas de cada espécie livres de defeitos e com diferentes diâmetros a fim de representar a variação da densidade entre indivíduos da área. A densidade básica foi determinada de acordo com a norma D2395-17 (ASTM, 2017), através do método de volume por imersão em água, utilizando-se as cunhas saturadas em água.

4.2.3. Caracterização química e energética das madeiras

Para a determinação do teor de extrativos totais, lignina e holocelulose, 10 cunhas de cada espécie foram moídas em moinho do tipo Willey e peneiradas e a fração retida entre as peneiras de 40 e 60 mesh foram utilizadas. As análises foram realizadas com três repetições de 2 g cada, de acordo com as normas D1107 (ASTM, 2021a) e D1106 (ASTM, 2021b), para a determinação dos extrativos e do teor de lignina total, respectivamente. O teor de holocelulose foi determinado por diferença, de acordo com a Equação 2 (Oliveira et al., 2022).

$$\%H = 100 - (\%TE + \%L + \%CZ) \quad \text{Eq. 2}$$

Em que: %H= teor de holocelulose (%); %TE= teor de extrativos totais (%); %CZ= teor de cinzas (%);

A avaliação da composição imediata da madeira foi realizada adaptando-se a norma D1762 (ASTM, 2007). Para isso, foram utilizadas cinco repetições por espécie, com 2 g cada, onde as amostras foram retiradas da amostra composta contendo as 10 cunhas de cada espécie já na granulometria específica para a análise. O poder calorífico superior (PCS) das madeiras foi determinado em uma bomba calorimétrica adiabática da marca IKA, modelo C200, com três repetições por espécie, utilizando 0,3 g em cada repetição, de acordo com a norma E870 (ASTM International, 2019). Após coletados os valores de PCS, foram determinados o poder calorífico inferior (PCI) e o poder calorífico útil (PCU) de acordo com a norma EN 14918 (DIN, 2014), de acordo com as Equações 3 e 4, respectivamente. Já a densidade energética (GJ.m⁻³) foi calculada pelo produto entre PCU e a densidade básica das respectivas espécies (Sette Jr. et al., 2018). Todas as análises químicas e energéticas foram realizadas com o objetivo de verificar as principais diferenças entre as espécies estudadas para, posteriormente, investigar como estas diferentes composições podem influenciar nas emissões gasosas durante o processo de combustão no forno de pizzas.

$$PCI = PCS - (600 \times 0.09 \times \%H) \quad \text{Eq. 3}$$

$$PCU = (PCI \times (1 - (0.01 \times \%U))) - (6 \times \%U) \quad \text{Eq. 4}$$

Em que: PCI= poder calorífico inferior; PCS= poder calorífico superior; PCU= poder calorífico útil; %H= teor de hidrogênio (assume-se 6% para a madeira de todas as espécies estudadas neste trabalho); %U= umidade da madeira no momento do uso para cocção (13%).

Também foi realizada a análise termogravimétrica das madeiras, utilizando-se um analisador térmico (Shimadzu TGA-60), em atmosfera inerte (N₂), com taxa de fluxo constante igual a 50 ml.min⁻¹, taxa de aquecimento igual a 10 °C.min⁻¹, com a temperatura variando de 50 a 650 °C. A massa utilizada foi igual a 15mg ± 4 mg, e o material utilizado estava na faixa granulométrica entre 200 e 270 mesh. Com o objetivo de verificar o comportamento da madeira frente à sua exposição ao calor.

Para cada uma das espécies, os espectros FT-IR foram obtidos por reflectância total atenuada, na faixa de 4000-600 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} e com o auxílio de um espectrômetro Bruker Tensor 27. Desse modo, foi possível observar e caracterizar os principais grupos funcionais presentes nas três espécies estudadas.

4.2.4. Simulações de cocção de pizzas em forno de alvenaria

Após as madeiras atingirem uma umidade média igual a 13%, foram realizadas três cocções por espécie, em um forno de alvenaria comercial, após 8 meses de funcionamento. Para isso, o forno foi equipado com 9 termopares do tipo K (Figura 6), distribuídos em diferentes posições dentro do forno, com o objetivo de acompanhar a dinâmica de distribuição térmica dentro do forno. Durante a cocção de pizzas ocorrem diferentes etapas de aquecimento, primeiro o forno precisa ser aquecido até uma determinada temperatura, em seguida, deve se manter nesta temperatura durante o período de cocção das pizzas e, ao final das cocções, o forno é resfriado naturalmente. Com o objetivo de observar a relação entre as emissões e as diferentes etapas de cocção que ocorrem no forno, como apresentado na Tabela 2, as cocções foram divididas em três etapas distintas. A primeira etapa é o aquecimento, que se inicia com a ignição do forno, e vai até o momento em que o forno atinge temperatura média de 600 °C no Termopar 3 (Figura 6 - A). A segunda etapa é a cocção, que se inicia logo após o término da fase anterior e, no caso deste experimento, durou 45 min. Em experimentos prévios, foi estabelecido que o tempo de cocção completa de uma pizza foi igual a 1 min e 30 segs. Desse modo, o tempo de cocção considerado nas análises posteriores foi definido como sendo o tempo necessário para realizar a cocção de 50 pizzas. A terceira etapa é o resfriamento, que se inicia após os 45 minutos de cocção e finaliza no momento em que o forno atinge temperaturas próximas a 200 °C.



Figura 6. Vista lateral do forno, mostrando os três termopares laterais – 1, 2 e 3, de baixo para cima, respectivamente (A), vista frontal do forno, mostrando o termopar posicionado próximo à saída dos gases, que ocorre na coifa (seta laranja e preto) acoplada na porta do forno (B), os termopares são indicados pelas setas em vermelho e preto

Tabela 2. Etapas da cocção e os parâmetros de definição de início e finalização de cada etapa

Etapa	Início	Finalização
Aquecimento	Ignição do forno.	Momento em que o forno atinge 600 °C no termopar 3.
Cocção	Momento em que o forno atinge 600 °C no termopar 3.	Após 45 min.
Resfriamento	Após o fim da etapa de cocção.	Momento em que o forno atinge 200 °C.

As imagens térmicas foram tiradas em uma câmera termal da marca FLIR, modelo T1020, com faixa de operação entre -40 °C e 2000 °C e precisão de $\pm 2\%$ de leitura a 25 °C para temperaturas até 1200 °C, a fim de se verificar, visualmente, a dinâmica de distribuição de calor dentro do forno.

O consumo médio de lenha, bem como o volume utilizado por queima, foi calculado com o valor de lenha inserido no forno durante todo o tempo do experimento. A lenha foi inserida em momentos aleatórios da cocção, garantindo que, após o termopar 3 ultrapassar 600 °C, a temperatura seria mantida nessa faixa, evitando variações superiores a 100 °C, simulando um forno comercial onde a inserção de lenha ocorre de acordo com a necessidade de se manter ou aumentar a temperatura. Após cada cocção, a massa de cinzas também foi pesada.

4.2.5. Análise dos efluentes gasosos emitidos durante a cocção

Os efluentes gasosos foram analisados em dois pontos distintos (Figura 7). O primeiro ponto está localizado a $0,5$ m de distância da porta do forno, onde foi utilizado um adaptador portátil (Aeroqual, modelo 200-S), onde foram avaliados a emissão de CO, CO₂ e Materiais Particulados (PM₁₀ e PM_{2,5}). Em cada repetição um sensor foi utilizado, para garantir que a coleta foi realizada durante todas as etapas de cocção. O segundo ponto de coleta está localizado na chaminé do forno, onde foi utilizado um analisador de gases móvel (Seitron, modelo Chemist 900). Neste segundo ponto, foram coletadas a temperatura dos gases, a concentração de oxigênio (%) e a emissão de CO (ppm), NO (ppm), NO₂ (ppm), H₂S (ppm), CO₂ (%), CH₄ (%), NO_x (ppm).



Figura 7. (A) Fotografia do forno com o analisador de gases portátil posicionado próximo à porta (seta laranja); (B) Estrutura da chaminé e o analisador móvel posicionado ao lado com os tubos de coleta indo até a chaminé na área externa (seta vermelha)

Na Figura 8 é apresentado um esquema metodológico que resume todo o processo realizado durante as caracterizações das madeiras e as análises das emissões dos efluentes gasosos.

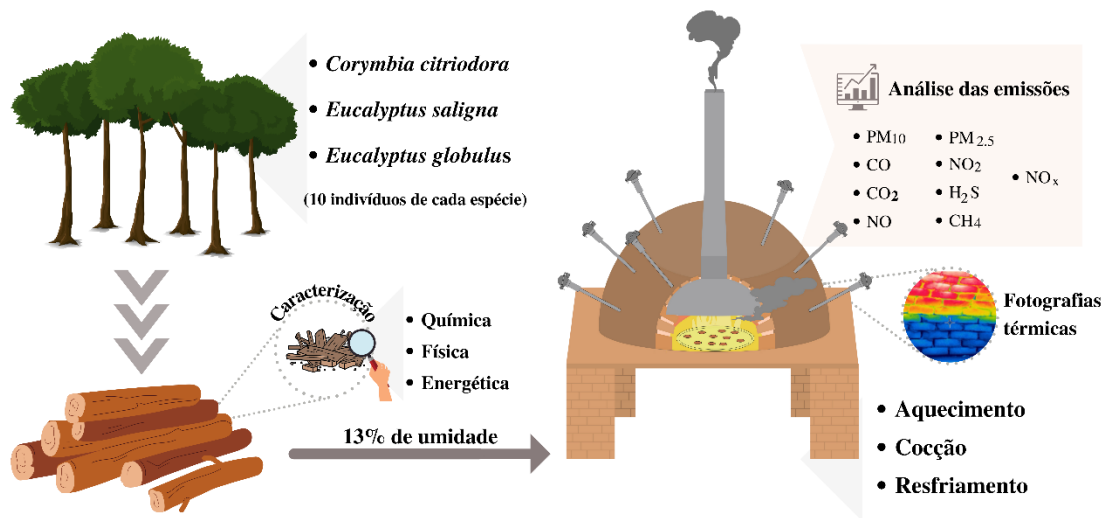


Figura 8. Resumo metodológico destacando todas as etapas executadas na execução deste trabalho

4.2.6. Análise dos dados

Os dados foram analisados em delineamento inteiramente casualizado, com três tratamentos (espécies) e diferentes números de repetições para cada análise. Inicialmente, foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk, e, em seguida, a análise da homoscedasticidade dos dados foi realizada pelo teste de Bartlett. Quando confirmados os pressupostos, foi realizada uma análise de variância (ANAVA). Em seguida, quando observado

diferenças significativas, os dados foram submetidos ao teste de Tukey a 95% de probabilidade. Em seguida, os dados das caracterizações das espécies foram correlacionados (Pearson) com os dados da emissão de efluentes gasosos que ocorreu durante a cocção dos alimentos. Por fim, os dados de temperatura foram correlacionados (Pearson) com a emissão de efluentes gasosos, a fim de verificar a possível relação entre a temperatura de cocção dos alimentos no forno e a emissão de gases durante diferentes etapas do processo.

4.3. Resultados e Discussão

4.3.1. Características físicas das madeiras

A umidade da madeira determinada logo após a coleta foi utilizada apenas para fim de estimativa do tempo de secagem necessário para que as espécies entrassem em equilíbrio com o local e estivessem em faixas inferiores a 20%. Na Figura 9 é possível observar a umidade da madeira no momento da sua utilização. A menor média foi encontrada para a madeira de *Eucalyptus globulus* (11%), e a maior foi observada na madeira de *Eucalyptus saligna* (13,2%). A umidade é um fator determinante para definir o uso da madeira para energia, haja visto que, quanto maior a umidade presente na madeira, maior é o gasto energético para a evaporação da água e, conseqüentemente, menos energia ficará disponível para ser convertida em calor no forno de cocção de alimentos, o que pode impactar diretamente na eficiência da combustão e, assim, gerar maior emissão de particulados (Simoneit, 2002). No entanto, caso a umidade da madeira seja muito baixa e a queima ocorra de maneira acelerada, a entrada de oxigênio na reação também pode ser comprometida e, conseqüentemente, a combustão não será completa e eficiente como deveria (Simoneit, 2002). Assim, a definição de uma faixa ideal de umidade para se utilizar a madeira no forno de cocção de pizzas é importante para garantir a maximização da disponibilidade de calor no forno para a cocção das pizzas. De acordo com o observado neste estudo, para as condições experimentais que foram adotadas, a madeira com umidade (base úmida) média de 13% é ideal para ser utilizada na cocção de pizzas.

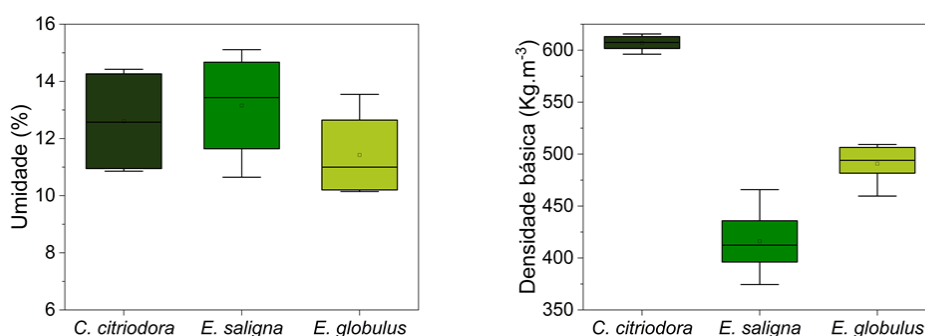


Figura 9. Propriedades físicas das espécies avaliadas

Além da umidade, a densidade é uma propriedade que também é limitante para determinar a aplicação energética da madeira. Madeiras mais densas possuem algumas vantagens frente as madeiras com baixa densidade, como maior concentração de massa por volume, o que vai reduzir os gastos com o transporte e armazenamento do combustível em local próximo a sua utilização. Das espécies estudadas neste trabalho, a *Corymbia citriodora* apresentou

os maiores valores de densidade (com uma média igual a 610 Kg.m^{-3}) e os menores valores foram encontrados para a espécie *E. saligna* (valor médio igual a 420 Kg.m^{-3}). Além dos fatores citados anteriormente, madeiras mais densas concentram maiores quantidades de energia por volume, o que favorece a redução do uso do combustível nos fornos de cocção. De maneira prática, utilizar madeiras mais densas e com alto poder calorífico nos fornos, a queima ocorre de maneira mais eficiente e o forno é abastecido menos vezes, ou seja, menos lenha é consumida durante a cocção das pizzas. No entanto, é válido salientar que é importante que as madeiras utilizadas sejam da mesma espécie, ou que possuam características semelhantes (densidade, poder calorífico e umidade), para garantir a uniformidade da queima durante todo o processo.

Nas análises de correlação com as emissões dos efluentes gasosos, a densidade da madeira demonstrou ter bastante influência positiva na emissão de diversos poluentes, com maiores destaques para a influência maior na emissão de CO e CO₂, mas também apresentando uma correlação forte e positiva na emissão de NO, NO₂, H₂S, NO_x e CH₄ (Figura 20, Material Suplementar). Um destaque importante merece ser dado à massa de madeira utilizada. Quanto maior a quantidade de madeira, maior a quantidade de efluentes gasosos liberados. Esta relação, apesar de parecer óbvia, revela a necessidade de se optar por madeiras mais eficientes, do ponto de vista energético, que possibilitem um menor gasto de combustível durante as atividades do forno. Neste estudo, a espécie que apresentou melhor desempenho energético foi a *E. saligna*, e é possível observar nos gráficos de emissão dos efluentes gasosos que, para alguns efluentes, os picos iniciais de emissão desta espécie foram maiores que os das outras duas. Mesmo assim, por apresentar um tempo de queima reduzido e, conseqüentemente, menor massa de material utilizado, a madeira de *E. saligna* apresentou menor fator de emissão total para todos os efluentes analisados no estudo.

4.3.2. Características químicas e energéticas das madeiras

Em relação a composição química da madeira, é importante destacar a variabilidade do teor de lignina e holocelulose (celulose e hemiceluloses) das diferentes espécies, bem como a leve variação no teor de extrativos totais encontrados na madeira das espécies estudadas, esta variabilidade nos permite prever com maior precisão como a variação na composição química da biomassa pode refletir em variações nas emissões dos efluentes gasosos. Em nosso estudo, a espécie que apresentou o maior teor de holocelulose (*C. citriodora*) apresentou, também, os maiores valores de densidade básica. Assim, Como mostrado na Figura 10, a madeira de *E. globulus* apresentou a maior média do teor de extrativos (7,1%) entre as espécies estudadas, haja visto que não houve diferença significativa entre a madeira de *C. citriodora* e *E. saligna* para esta propriedade (ambas apresentaram média próxima a 6,75%. Por apresentar uma variedade significativa entre os compostos considerados extrativos da madeira, acredita-se que estes materiais podem influenciar na emissão de algum poluente emitido durante a queima da madeira. Em nosso estudo, foi observado uma correlação positiva forte entre o teor de extrativos e a emissão de materiais particulados, tanto o PM_{2,5} quanto o PM₁₀, além de uma correlação positiva média entre o teor de extrativos e a emissão de CO₂ e NO durante a queima da biomassa no forno de pizzas.

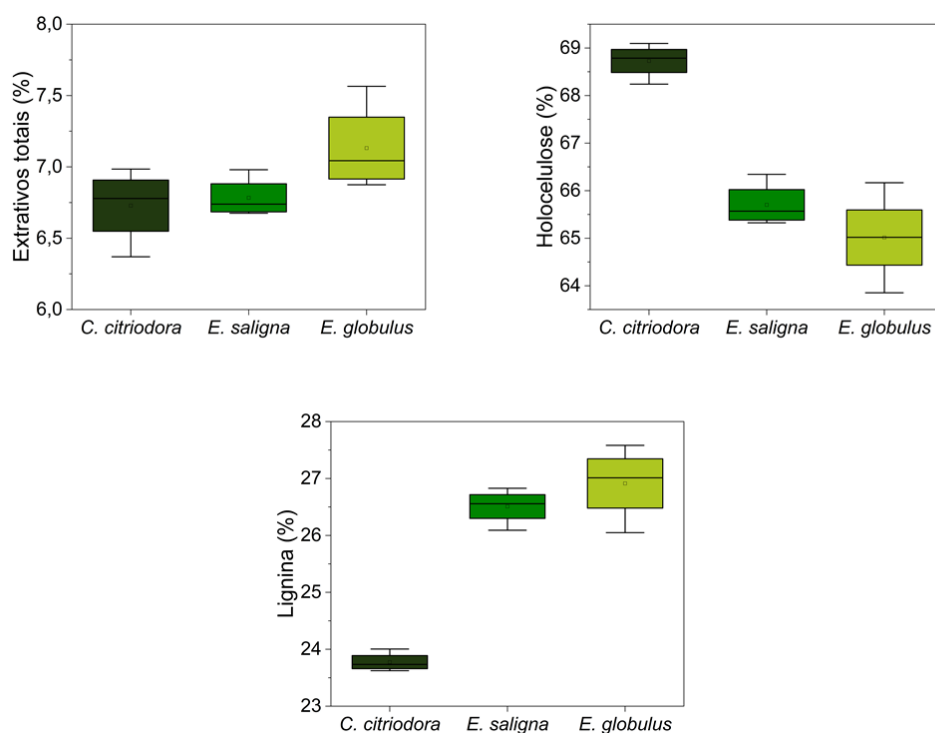


Figura 10. Composição química das madeiras das espécies estudadas

Para o teor de holocelulose, os maiores valores foram encontrados na madeira de *C. citriodora* (68,8%) e os menores valores médios foram encontrados para a madeira de *E. globulus* (65%). O contrário ocorre em relação ao teor de lignina das espécies estudadas, o *E. globulus* apresentou um maior valor médio (27%), com a madeira de *E. saligna* apresentando valores médios bem próximos, já os menores valores médios foram encontrados na madeira de *C. citriodora* (23,7%). O teor de lignina é um parâmetro importante para avaliar a viabilidade energética da madeira, haja visto que alguns estudos afirmam que este componente químico da madeira é um dos principais responsáveis pelo maior poder calorífico da madeira. O teor de extrativos, propriedade que também influencia no poder calorífico superior (PCS) da madeira, apresentou correlação positiva forte com a emissão de materiais particulados (PM_{2,5} e PM₁₀), consequentemente, esta mesma correlação positiva forte foi encontrada para o PCS. O teor de lignina apresentou ligeira influência positiva na emissão dos materiais particulados, no entanto, apresentou correlação negativa forte para quase todos os outros efluentes observados (CO, NO₂, H₂S, CH₄). Ou seja, quanto maior o teor de lignina da espécie, menor a emissão desses efluentes. Já quando avaliada a influência do teor de holocelulose, que é inversamente proporcional ao teor de lignina, ocorre a relação inversa com a emissão de diferentes poluentes. Ou seja, o maior teor de holocelulose presente nas espécies se correlacionou positivamente com a emissão de CO, NO₂, H₂S e CH₄ na saída da chaminé, além de se correlacionar positivamente com a emissão de CO e CO₂ na região próxima a porta do forno.

Os parâmetros avaliados na análise química imediata são importantes para direcionar os usos da madeira como combustível. Por exemplo, madeiras que apresentam alto teor de cinzas, podem causar problemas em alguns tipos de equipamentos de queima ou fornos, pela massa de cinzas geradas e as dificuldades para a retirada desse material de dentro dos fornos. Já os teores de materiais voláteis e carbono fixo estão relacionados com a dinâmica da combustão da madeira no forno, de maneira mais específica, o teor de materiais voláteis está relacionado com a

facilidade do material entrar em ignição e o teor de carbono fixo pode estar relacionado com a velocidade de queima do material, ou seja, quanto maior o teor de carbono fixo, mais lento a madeira irá se transformar completamente em cinzas, ou seja, terá sua fração orgânica degradada pela ação do calor. A Figura 11 apresenta os teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas da madeira das três espécies avaliadas neste trabalho.

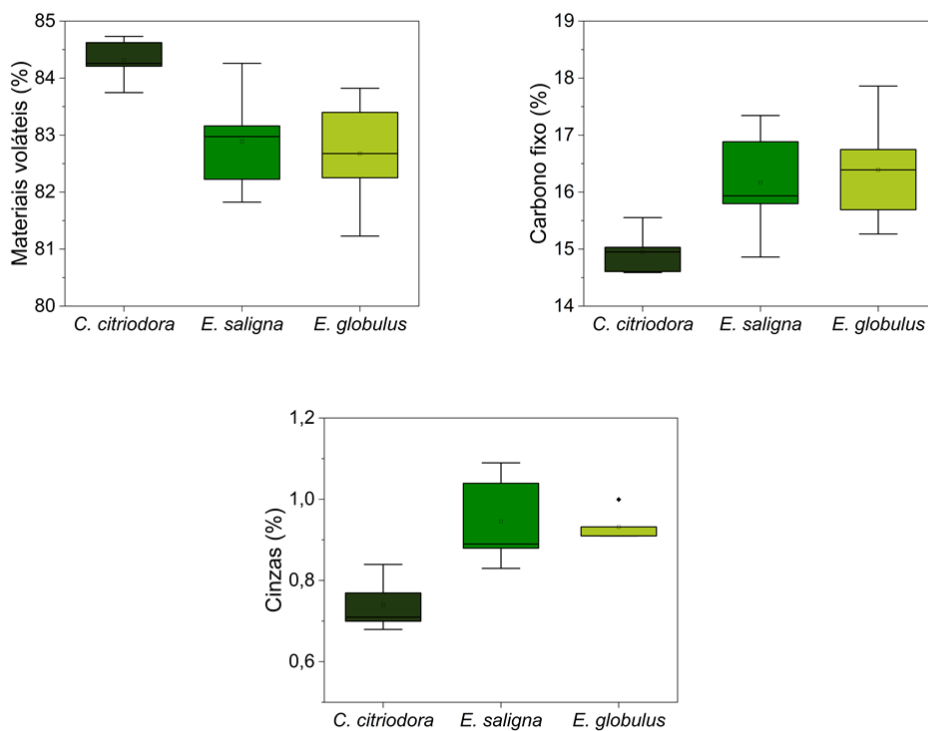


Figura 11. Análise química imediata das madeiras estudadas

De acordo com os dados coletados, o maior teor de materiais voláteis foi encontrado na madeira de *C. citriodora* (84,3%) e as menores médias foram encontradas na madeira de *E. saligna* (82,9%) e *E. globulus* (82,5%), respectivamente. Já em relação ao teor de carbono fixo a relação inversa ocorreu, assim, os maiores valores foram encontrados para a madeira de *E. globulus* (16,5%) seguido de *E. saligna* (16%) e os menores valores foram encontrados para a madeira de *C. citriodora* (14,9%). Já o teor de cinzas, o menor valor foi encontrado para a madeira de *C. citriodora* (0,71%), seguido da madeira de *E. saligna* (0,9%) e *E. globulus* (0,91%).

Apesar da pequena diferença no teor de cinzas das espécies, é válido levar em consideração a quantidade de madeira que se utiliza por dia nos fornos de cocção de alimentos, como é o caso dos fornos de pizzarias e padarias. Esta quantidade de cinzas geradas necessita de uma correta destinação, haja visto que após cada cocção o ideal é que o forno seja limpo para facilitar a queima da próxima fornada e evitar possíveis contaminações para os alimentos, ainda mais sabendo que as cinzas não podem ser retiradas durante a atividade do forno, necessitando de um tempo entre uma fornada e outra (Zhai et al., 2021). Estudos recentes apontam a possível destinação das cinzas da biomassa aos solos, trazendo benefícios aos plantios, desde que a combustão seja realizada em equipamentos eficientes e com biomassa de boa procedência como material combustível, como é o caso de madeira oriunda de florestas plantadas (Zhai et al., 2021).

Em relação às propriedades energéticas das madeiras estudadas, como apresentado na Figura 12, a madeira de *E. globulus* apresentou maior poder calorífico superior (PCS) ($21,1 \text{ MJ.Kg}^{-1}$) e, conseqüentemente, maior poder calorífico inferior - PCI ($16,8 \text{ MJ.Kg}^{-1}$) e maior poder calorífico útil - PCU ($15,6 \text{ MJ.Kg}^{-1}$), haja visto que estas propriedades diferem do PCS por incluírem nos cálculos a energia gasta com a queima do hidrogênio presente na madeira e do hidrogênio com a água presente na madeira durante a combustão da biomassa, respectivamente. Os menores valores para PCS ($19,3 \text{ MJ.Kg}^{-1}$), PCI ($16,3 \text{ MJ.Kg}^{-1}$) e PCU ($15,3 \text{ MJ.Kg}^{-1}$) foram encontrados na madeira de *E. saligna*.

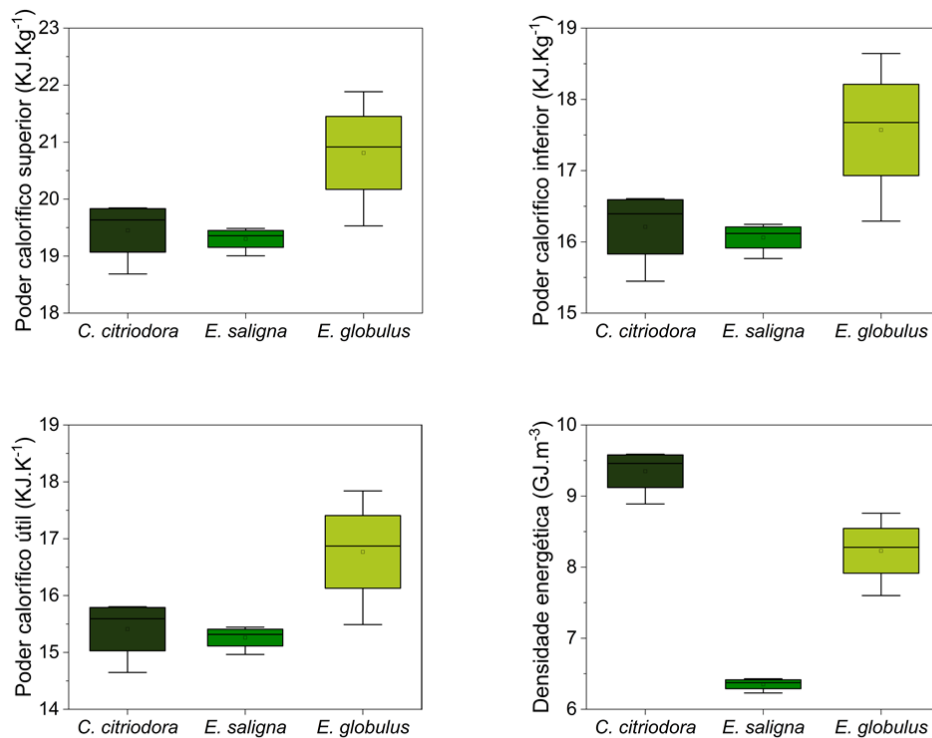


Figura 12. Características energéticas das madeiras das espécies estudadas

Já em relação a densidade energética, que, além do poder calorífico útil, leva em consideração a densidade da madeira, os maiores valores foram encontrados na madeira de *C. citriodora* ($9,4 \text{ GJ.Kg}^{-1}$), seguido da madeira de *E. globulus* ($8,3 \text{ GJ.Kg}^{-1}$) e *E. saligna* ($6,4 \text{ GJ.Kg}^{-1}$). A propriedade de densidade energética leva em consideração a quantidade de energia contida em um determinado volume de madeira, sendo uma propriedade de grande interesse dos setores que utilizam a madeira para energia. Esta propriedade pode servir de parâmetro para os estabelecimentos de pequeno porte que, mesmo sem saber a teoria por trás do fato, conseguem compreender que algumas madeiras são mais ou menos econômicas e esta economia está diretamente relacionada com a quantidade de energia disponível por volume de madeira utilizado no forno. Ou seja, quanto maior a densidade energética da madeira, menos material será necessário queimar para a cocção das pizzas. Esta informação é de grande importância para os estabelecimentos comerciais, levando em consideração que o gasto com combustível é um ponto significativo nos custos que estão envolvidos com a produção de pizzas.

Em relação ao comportamento térmico da madeira, avaliado através da análise termogravimétrica, as curvas TG e DTG apontam comportamentos semelhantes nas três espécies estudadas (Figura 13). No entanto, a

maior semelhança é entre o *E. saligna* e o *E. globulus*, que apresentaram taxas de perda de massa bem próximas, na faixa entre 150 e 350 °C. No entanto, a partir desta faixa de temperatura, o *E. globulus* perdeu mais massa que as outras espécies, apresentando uma menor massa residual. É válido salientar que, como se trata de um processo de queima em atmosfera inerte, a massa residual da análise representa a massa de cinzas mais a massa de carbono fixo presente no material, entre outros materiais que não foram degradados nestas condições.

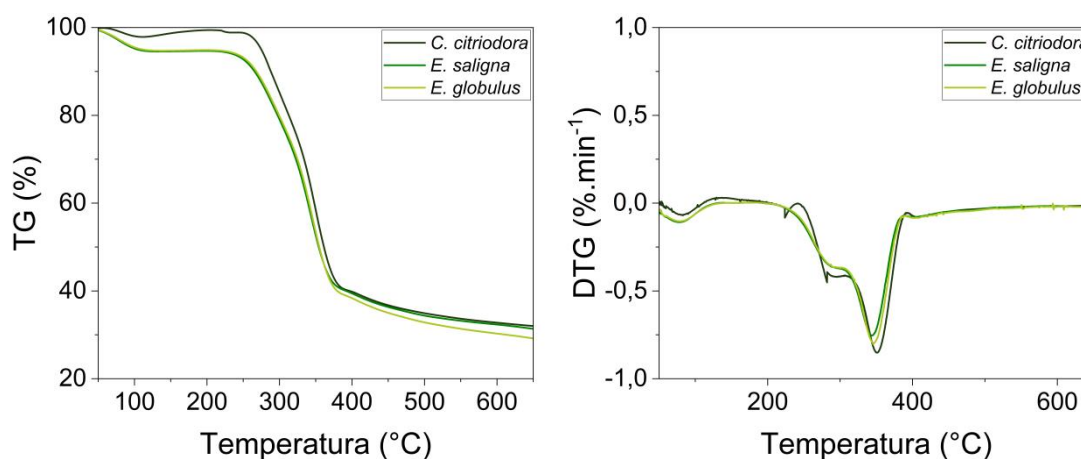


Figura 13. Curvas TG/DTG das madeiras das espécies estudadas

O maior pico de perda de massa da madeira de *C. citriodora* na faixa de temperatura entre 150 e 350 °C, confirmado pela curva DTG, pode estar relacionado com a maior quantidade de holocelulose presente na madeira desta espécie, frente ao baixo teor de lignina encontrado, quando comparado com a madeira das outras duas espécies estudadas. Mesmo com maior pico de perda de massa em temperaturas mais baixas, a madeira de *C. citriodora* apresentou a maior massa residual (32%) dentre as espécies estudadas, frente aos 29% apresentados pela madeira de *E. globulus*. Esta maior resistência térmica com a saída dos carboidratos e fixação do carbono através de outras estruturas pode estar relacionada com a modificação da lignina com a ação do calor, que pode promover um aumento da resistência com o rearranjo de suas estruturas químicas (Protásio et al., 2022; Silva et al., 2019). Consequentemente, esta maior estabilidade térmica da madeira está diretamente relacionada com uma queima mais lenta, o que pode resultar em um menor consumo de lenha no forno (Souza et al., 2022).

Os espectros do FTIR das espécies em estudo são apresentados na Figura 14. É possível verificar que *E. citriodora*, *E. saligna* e *E. globulus* mostraram similaridade nos grupos funcionais identificados em suas madeiras. A diferença se atribui apenas a intensidade de absorção dos picos, sendo mais acentuados em determinadas faixas de comprimentos de ondas. Este padrão também pode ser observado em outras espécies, como *Eucalyptus robusta* Smith. (Re et al., 2020) e *Eucalyptus camuldensis* Dehn (Gonultas e Candan, 2018), sendo possível constatar que as diferentes espécies do gênero *Eucalyptus* tendem a apresentar um padrão na sua constituição química. Esta análise, apesar de ser específica, é importante, a nível laboratorial, para validar as análises químicas realizadas anteriormente e comprovar a viabilidade da utilização de análises mais simples e de fácil reprodutibilidade em laboratórios com menor capacidade operacional.

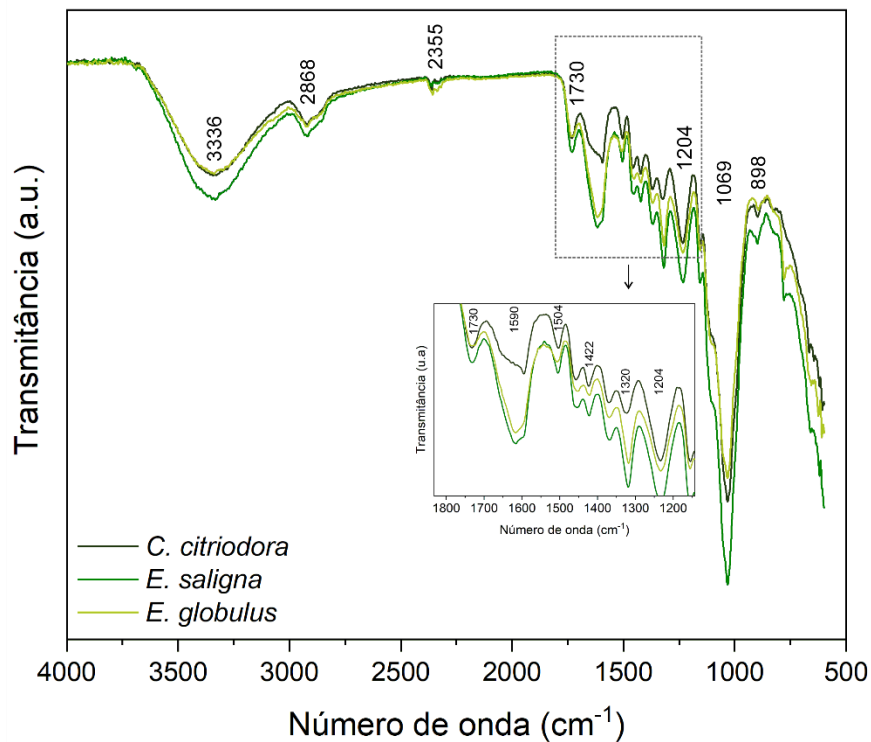


Figura 14. Espectro FT-IR das madeiras das espécies estudadas

Estas pequenas modificações são observadas em outras análises e são importantes para a busca de características da madeira que possuem maior ou menor influência na quantidade e na qualidade das emissões dos efluentes gasosos. No entanto, para aumentar o nível de confiabilidade e a busca por melhores respostas quanto a influência das características da madeira nas emissões dos efluentes gasosos, novos estudos podem ser realizados utilizando espécies de diferentes gêneros e com características bem distintas, mas que já sejam empregadas na geração de energia em fornos de pizzaria. Assim, com características totalmente distintas entre si, pode ser possível encontrar valores ainda mais significativos entre as correlações.

4.3.3. Análise das cocções

Em relação a análise das cocções, a massa e o volume de madeira utilizados são apresentados na Figura 15. A maior massa de madeira utilizada foi a da espécie *C. citriodora* (33,8 Kg/cocção) e a menor massa utilizada foi a da espécie *E. saligna* (19,3 Kg/cocção). Para o volume, os dados seguiram o mesmo padrão, haja visto que o volume foi calculado relacionando a massa de madeira utilizada em cada cocção pela densidade básica de cada espécie. Assim, o maior volume utilizado foi da madeira de *C. citriodora* (0,055 m³/cocção) e o menor volume utilizado foi da madeira de *E. saligna* (0,046 m³/cocção)

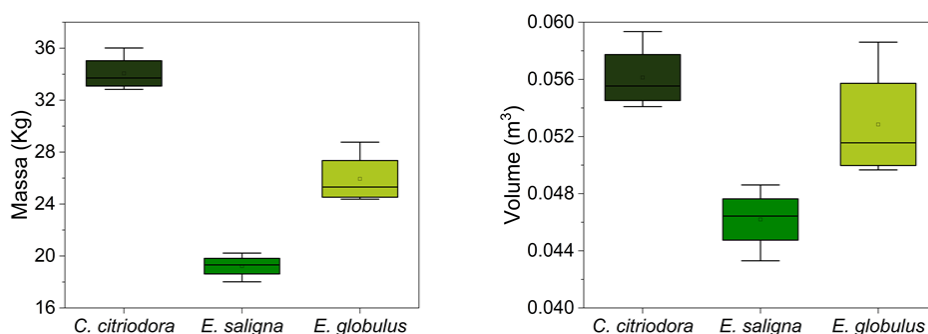


Figura 15. Massa e volume de madeira de cada espécie utilizados nas cocções

Estes dados são importantes pois a escolha de espécies mais econômicas, do ponto de vista de gasto de combustível por cocção, pode representar um ganho ou uma perda significativa nos estabelecimentos que utilizam a madeira para a cocção de alimentos e isto está diretamente relacionado à estabilidade térmica do material durante a sua queima (Souza et al., 2022). Esta informação é ainda mais importante em pizzarias ou padarias de grande porte, que necessitam de longas jornadas de trabalho onde o forno necessita permanecer em uso durante um longo período. Ao longo das análises, foi observado que o maior gasto de madeira ocorre na fase inicial, onde o forno se encontra em temperatura ambiente (ou próximo disso, devido às cocções anteriores) e precisa atingir uma temperatura mínima para que a cocção possa ocorrer de maneira satisfatória sem comprometer a qualidade da pizza (Figura 17).

É possível observar que as análises tiveram maior duração para a madeira de *E. globulus* e menor duração para a madeira de *E. saligna* (Figura 16). Mesmo com cerca de 1,6 h de diferença entre a duração dos processos da madeira de *C. citriodora* para a madeira de *E. globulus*, que foi o processo mais duradouro, este comportamento não refletiu no gasto de madeira, haja visto que a madeira de *C. citriodora* apresentou maior consumo de lenha para a realização de todo o ciclo de cocção (Figura 15). A madeira de *C. citriodora* apresentou menor estabilidade térmica durante a fase de cocção, é possível constatar através da alta amplitude térmica alcançada pelos diferentes termopares. Com esta alta variação, é necessário inserir mais madeira para que o forno se mantenha numa temperatura adequada para a cocção das pizzas, logo, o maior consumo em massa desta madeira (Figura 15) está diretamente relacionado com este fato. Da mesma forma, o menor consumo de madeira da espécie *E. saligna* está diretamente relacionado com a alta estabilidade térmica observada nas cocções, o que resultou em uma queima mais rápida e, conseqüentemente, com maior economia de combustível.

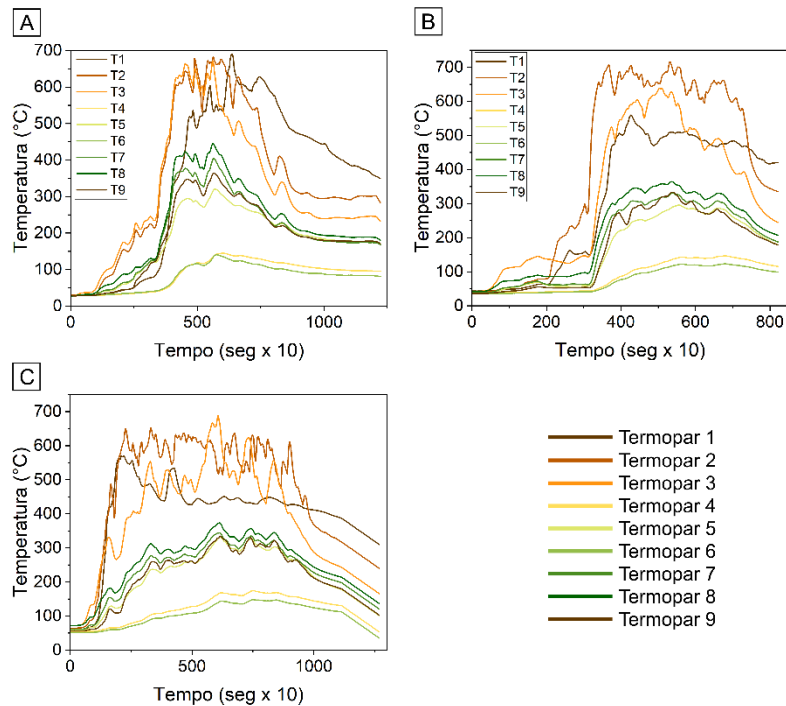


Figura 16. Temperatura média do forno de acordo com as espécies utilizadas (A – *C. citriodora*; B – *E. saligna*; C – *E. globulus*)

Como as cocções com a madeira de *E. globulus* foram realizadas por último, é possível observar que, além do forno já estar em uma temperatura inicial relativamente mais alta do que nas outras cocções, o forno atingiu altas temperaturas em menores tempos, mesmo sendo necessário uma quantidade maior de madeira para manter o processo na temperatura de cocção desejada. Além disso, como é possível observar na Figura 12, a madeira de *E. globulus* apresentou maior poder calorífico, tanto superior quanto útil, o que pode ter impactado positivamente na quantidade de energia liberada para o forno desde o início do processo até a fase de resfriamento.

Estas informações são importantes para nortear os estabelecimentos comerciais em relação à sua programação de cocção e funcionamento do forno. Ou seja, uma frequência maior de uso, com a madeira adequada, pode resultar numa diminuição significativa do tempo de aquecimento do forno e, conseqüentemente, numa redução do consumo de lenha, haja visto que o material refratário presente no forno garante uma retenção de calor por mais tempo, disponibilizando parte desse calor para a cocção seguinte. Como as cocções seguiram a sequência *C. citriodora* > *E. saligna* > *E. globulus*, é possível observar visualmente como esta retenção de calor é gradativa.

De acordo com os dados de visualização dos termopares, em alinhamento com as fotografias obtidas a partir da câmara térmica (Figura 17), o calor é irradiado com maior intensidade na cúpula do forno, sendo transportado até a região contrária onde se encontra o combustível. Dessa forma, o forno se aquece por completo e a cocção da pizza ocorre em curtos períodos.

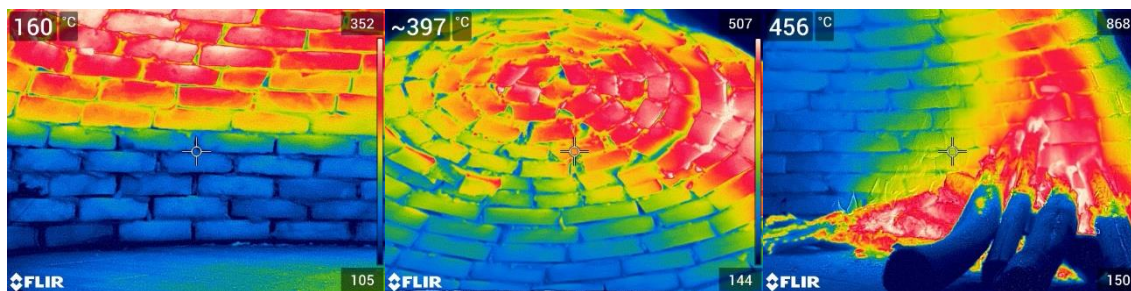


Figura 17. Fotografias térmicas da parte interior do forno de cocção de pizzas, da direita para a esquerda simula a mesma direção no interior do forno, passando do lodo onde a madeira é inserida, a cúpula e o lado oposto à entrada da madeira

No entanto, haja visto que a maior condução de calor ocorre através da parte superior do forno, possíveis mudanças na estrutura do forno, como a redução da altura da cúpula, poderiam facilitar o transporte de calor através de toda a estrutura, o que poderia reduzir o tempo de aquecimento do forno e reduzir os gastos de combustível para manter o forno numa temperatura estabilizada. Esta relação altura/largura da cúpula já foi discutida em trabalhos anteriores, indicando, também, uma possível relação deste fator com a maior liberação de poluentes durante o processo de cocção de pizzas (Buonanno et al., 2010; L. Wang et al., 2018).

4.3.4. Análise dos efluentes gasosos emitidos durante a cocção

Em relação aos efluentes gasosos emitidos durante todo o processo de cocção levando em consideração o aquecimento, a cocção e o resfriamento do forno, é possível observar uma alta variação entre as três diferentes espécies estudadas, como observado na Figura 18. É possível observar que para todos os efluentes gasosos avaliados durante as queimas, com exceção do CO e do H₂S, nas etapas iniciais, ou seja, aquecimento do forno e cocção propriamente dita, são liberadas maiores quantidades de gases do que na etapa final da queima, ou seja, durante o resfriamento do forno. Alguns estudos apontam que as variadas condições de temperatura durante a queima, bem como a intensidade de calor e a quantidade de ar presente na combustão podem influenciar diretamente nos compostos emitidos durante o processo (Simoneit, 2002).

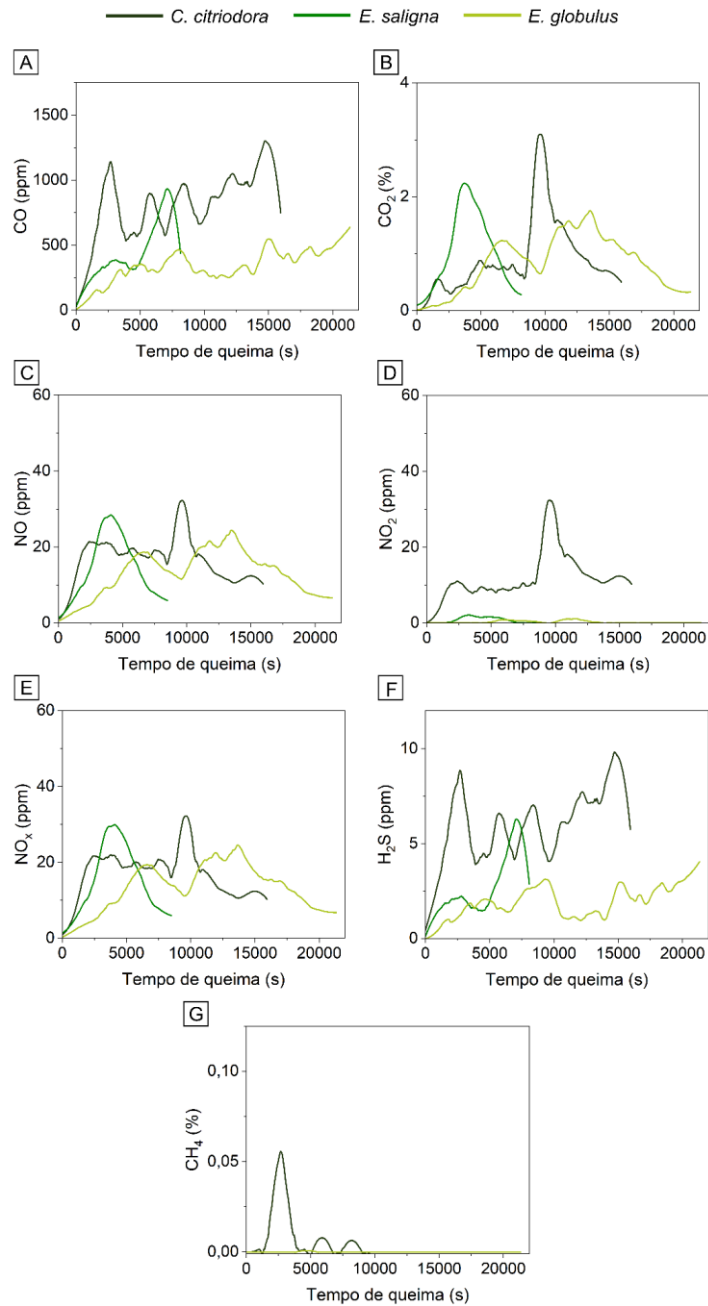


Figura 18. Efluentes gasosos emitidos durante a queima das diferentes espécies estudadas, coletados na chaminé

Além disso é possível observar que as curvas de detecção destes dois efluentes (CO e H₂S) apresentam comportamentos estritamente semelhantes durante as etapas de queima da madeira, variando apenas na intensidade/quantidade de efluentes emitidos durante estes picos. A emissão do CO está diretamente relacionada com a combustão incompleta da madeira o que, por sua vez, acaba gerando grandes quantidades de material particulado. Visualmente, de maneira empírica, é possível observar uma maior saída de fumaça mais densa, diferente das etapas posteriores, quando o forno atinge temperaturas maiores e é possível observar a mudança na coloração da fumaça que é emitida através da chaminé. Além da saída na chaminé, esta maior liberação de fumaça com aspecto denso também ocorre na porta do forno, prejudicando diretamente a qualidade do ar dos trabalhadores que estão manuseando o forno e as pizzas.

Já o H_2S , que é comumente encontrado no biogás produzido a partir da queima da biomassa, pode causar diversos problemas à saúde, até mesmo em baixas concentrações (abaixo de 20 ppm), podendo causar desde problemas mais simples, como irritação nos olhos, dor de cabeça e problemas respiratórios, até mesmo problemas a longo prazo, como tontura, irritabilidade e perda de memória (Chan et al., 2022; Dashtestani et al., 2021). Resultados semelhantes estão associados aos óxidos de nitrogênio (NO_x) encontrados, principalmente, a partir da queima incompleta da biomassa (Oluwoye et al., 2020). A emissão dos NO_x contribui diretamente com diversos problemas ambientais relacionados às mudanças climáticas e até mesmo problemas no sistema respiratório humano (Oluwoye et al., 2020). Já a emissão de CH_4 foi detectada apenas na madeira de *C. citriodora*. O metano emitido pela queima da biomassa é um dos responsáveis pelos efeitos do aquecimento global na atmosfera e alguns estudos apontam que, devido à sua longa duração, pode atingir camadas da estratosfera, interferindo até mesmo nos ciclos de gases que ocorrem nesta região (Gupta et al., 2001). A liberação exagerada destes poluentes é preocupante, especialmente quando consideramos a quantidade de estabelecimentos comerciais que realizam a cocção de pizzas utilizando a biomassa como combustível. Em grandes centros, este problema pode ser ainda mais preocupante, haja visto a grande quantidade de outros poluentes atmosféricos que já são gerados a partir de outras fontes.

As concentrações dos efluentes gasosos coletados próximos à porta do forno são apresentados na Figura 19. Os valores de CO e CO_2 coletados próximos a porta do forno foram próximos aos encontrados na chaminé, indicando maior emissão de monóxido de carbono durante a etapa de cocção e resfriamento e maiores picos de CO_2 nas etapas iniciais da queima, com destaque para a madeira de *C. citriodora*, que emitiu maiores teores de CO e CO_2 em ambas as etapas da queima da madeira no forno. De acordo com a observação prática, é possível observar que a maior saída de CO e CO_2 no início das cocções e em etapas onde a temperatura do forno diminui de maneira significativa está relacionada com a liberação de uma maior quantidade de fumaça na porta do forno. Levando em consideração que as pizzarias são estabelecimentos fechados e que nem todos estes locais possuem sistema de exaustão e ventilação adequados, o risco à saúde do trabalhador é ainda maior durante estes períodos.

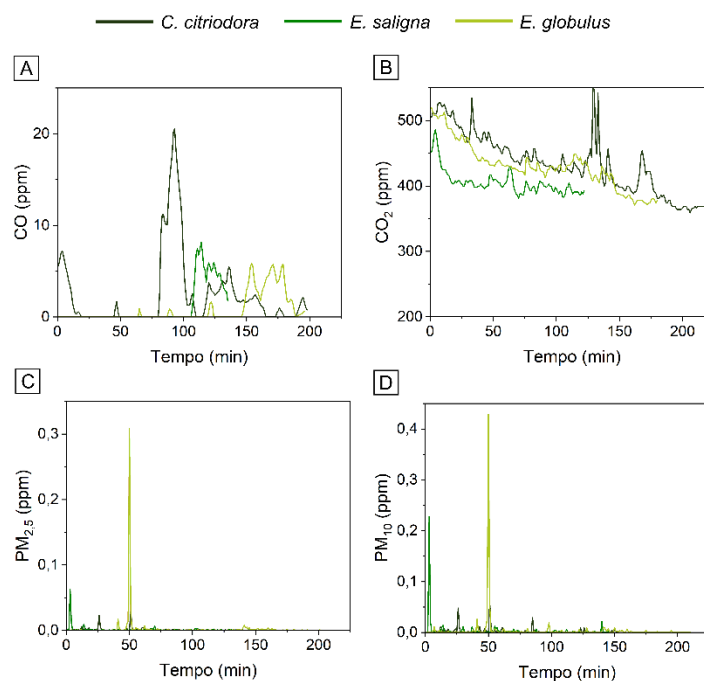


Figura 19. Efluentes gasosos, coletados próximos a porta, com a queima das diferentes espécies estudadas

Em relação ao teor de material particulado (PM_{10} e $PM_{2,5}$) observados, é possível verificar que a madeira de *E. globulus* apresentou maiores médias que as outras espécies estudadas, com os maiores picos encontrados nas etapas iniciais da queima (aquecimento e cocção). No entanto, no momento logo após a ignição, foi verificada uma emissão significativa de materiais particulados da madeira de *E. saligna*. No entanto, este padrão não se manteve ao longo de todo o processo, nem outros picos de grandes intensidades surgiram durante o aquecimento, a cocção nem o resfriamento do forno. Os materiais particulados, além da possível contribuição para as mudanças climáticas, apresentam riscos significativos à saúde humana (Lima et al., 2020). Estudos realizados em pizzarias já apontaram a alta emissão de materiais particulados, de acordo com o combustível utilizado no forno, indicando, também, o risco de presença de metais pesados associados às estruturas dos materiais particulados, o que pode agravar ainda mais o risco direto à saúde humana (Li et al., 2022; Lima et al., 2020). Durante estes períodos em que ocorrem maiores emissões de materiais particulados na porta do forno é possível sentir um desconforto e irritação nos olhos e gargantas, o que pode evoluir para quadros mais graves caso a exposição ocorra de forma prolongada, sendo necessária maior atenção para os trabalhadores que trabalham diariamente nestes ambientes.

Para incentivar a criação e desenvolvimentos de estabelecimentos que invistam na diminuição da utilização de combustíveis fósseis e valorizem a utilização de fontes renováveis de maneira adequada e ambientalmente correta, é preciso a criação de políticas públicas fortes e eficientes, com padrões específicos e rigorosos sobre as emissões gasosas a partir da queima da biomassa (Villeneuve et al., 2012). Aqui no Brasil, apesar de existir um consenso sobre a necessidade de criação de legislações específicas, ainda não foram criadas normas e padrões específicos que correlacionem as biomassas disponíveis no país, e suas características específicas, com os índices de qualidade do ar no interior das residências ou estabelecimentos comerciais (Lima et al., 2020). Assim, este trabalho pode ser considerado um pontapé inicial neste sentido.

4.3.5. Aplicações práticas e futuras pesquisas

Os resultados encontrados neste trabalho podem auxiliar na criação de políticas públicas nacionais e internacionais direcionadas ao setor de alimentos que utiliza a biomassa como combustível, haja visto que, com as informações sobre a influência das características da madeira nas emissões de efluentes gasosos é possível selecionar espécies com características físico-químicas mais adequadas para a queima, promovendo economia de combustível e redução da emissão de elementos nocivos ao meio ambiente e às populações. Sabendo do interesse de diversos países do mundo para alcançar a sustentabilidade das suas atividades, estas políticas públicas podem influenciar diretamente no alcance de diferentes Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas (United Nations, 2015). Estes objetivos estão relacionados com a saúde e bem-estar da população mundial, bem como com a sustentabilidade ambiental desejada por diversos países ao redor do mundo.

De maneira mais específica, estes resultados podem contribuir para a obtenção dos objetivos 3 (Saúde e bem-estar), haja visto que os impactos dos gases nocivos emitidos durante a combustão da biomassa podem afetar tanto os trabalhadores que atuam diretamente com os equipamentos de queima quanto as populações em regiões com grandes concentrações de fornos de pizzas. Além disso, estes resultados podem impactar diretamente no alcance dos objetivos 7 (energia limpa e acessível), 11 (cidades e comunidades sustentáveis) e 13 (ação contra a mudança global do clima), haja visto a importância da biomassa (lenha) como uma fonte de energia limpa e renovável, disponível de maneira abundante e que pode ser consumida de maneira consciente. Assim, o maior conhecimento das características da lenha e seu impacto na emissão dos efluentes gasosos pode contribuir para o

aumento da sustentabilidade nas cidades e comunidades onde os fornos de pizza se encontram e, de maneira macro, podem contribuir diretamente na redução de gases do efeito estufa, auxiliando nas ações contra a mudança do clima a nível global. Estas mudanças também podem impactar diretamente na saúde humana, haja visto a provável relação entre as mudanças climáticas e diferentes problemas causados à saúde humana (Jones, 2022). Este impacto é ainda mais significativo em países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, principalmente devido à mudança recente dos direcionamentos da política ambiental do país, frente aos pronunciamentos do novo governo na 27ª Conferência do Clima da Organização das Nações Unidas (COP 27). Tais pronunciamentos vão de encontro com a agenda global de enfrentamento às mudanças climáticas, indicando que além da priorização do uso de energias renováveis e mais sustentáveis, a redução de gases do efeito estufa oriundo de diferentes fontes é de grande importância no direcionamento das políticas públicas do país.

As pesquisas futuras devem focar na utilização de diferentes espécies, com composições químicas mais variadas, a fim de criar modelos matemáticos que possam prever com acurácia e maior riqueza de detalhes como a composição química da madeira pode influenciar na quantidade e qualidade dos gases liberados durante a cocção de alimentos. Além disso, as pesquisas também devem avaliar a influência dos fatores relacionados à madeira (como a umidade e o tamanho das peças) na emissão de efluentes gasosos durante a combustão da madeira no forno. Outro ponto importante que deve ser avaliado futuramente é a influência da composição química da lenha no alimento após a cocção, ou seja, quais e quantos elementos nocivos podem ser repassados aos alimentos e como isso pode impactar na saúde humana. Por último, é importante o desenvolvimento de parcerias com pesquisadores da área da saúde, para que seja investigado a influência dos efluentes gasosos na saúde dos trabalhadores (principalmente na saúde respiratória) bem como dos clientes que acessam estabelecimentos onde não há um sistema de exaustão eficiente.

4.4. Conclusões

Com a realização desta pesquisa, foi possível observar que há correlações positivas e fortes entre as propriedades das madeiras e a quantidade e a qualidade dos efluentes gasosos liberados durante a cocção de pizzas. A massa de madeira utilizada tem correlação significativa com a emissão de todos os poluentes. Assim, optar por madeiras mais eficientes energeticamente, ou seja, com maior densidade energética, o que resulta em menor consumo de combustível. Assim, além de gerar economia financeira, é possível reduzir diretamente a emissão dos efluentes gasosos. Além disso, também foi possível observar que a densidade básica, o teor de holocelulose e extrativos se correlacionaram positivamente com a emissão de diferentes efluentes gasosos em fornos de cocção de pizzas.

No entanto, para a confirmação e validação destas constatações, é importante que pesquisas futuras busquem avaliar outras espécies, com propriedades diferentes e variadas, com o objetivo de criar um modelo estatístico capaz de estimar a quantidade de efluentes gasosos liberados durante a queima da madeira, de acordo com as suas características. Além disso, se faz importante a criação de políticas públicas e normativas que estabeleçam padrões de qualidade do ar no interior e no exterior de estabelecimentos comerciais, principalmente buscando atingir os objetivos e compromissos ambientais definidos para os próximos anos.

Referências

ASTM, 2021a. D1107-21 - Standard Test Method for Ethanol-Toluene Solubility of Wood.

- ASTM, 2021b. D1106-21 - Standard Test Method for Acid-Insoluble Lignin in Wood.
- ASTM, 2017. D2395-17 - Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Wood and Wood-Based Materials. <https://doi.org/10.1520/D2395-17>
- ASTM, 2007. D 1762-84: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. <https://doi.org/10.1520/D1762-84R07.2>
- ASTM International, 2019. E870 - 82(2019) Standard Test Methods for Analysis of Wood Fuels.
- Báder, M., Németh, R., Sandak, J., Sandak, A., 2020. FTIR analysis of chemical changes in wood induced by steaming and longitudinal compression. *Cellulose* 27, 6811–6829. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03131-8>
- Buonanno, G., Morawska, L., Stabile, L., Viola, A., 2010. Exposure to particle number, surface area and PM concentrations in pizzerias. *Atmos. Environ.* 44, 3963–3969. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.07.002>
- Cereceda-Balic, F., Toledo, M., Vidal, V., Guerrero, F., Diaz-Robles, L.A., Petit-Breuilh, X., Lapuerta, M., 2017. Emission factors for PM_{2.5}, CO, CO₂, NO_x, SO₂ and particle size distributions from the combustion of wood species using a new controlled combustion chamber 3CE. *Sci. Total Environ.* 584–585, 901–910. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.136>
- Chan, Y.H., Lock, S.S.M., Wong, M.K., Yiin, C.L., Loy, A.C.M., Cheah, K.W., Chai, S.Y.W., Li, C., How, B.S., Chin, B.L.F., Chan, Z.P., Lam, S.S., 2022. A state-of-the-art review on capture and separation of hazardous hydrogen sulfide (H₂S): Recent advances, challenges and outlook. *Environ. Pollut.* 314, 120219. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120219>
- Dashtestani, F., Nusheh, M., Siritwongrungsom, V., Hongrapipat, J., Materic, V., Pang, S., 2021. Effect of H₂S and NH₃ in biomass gasification producer gas on CO₂ capture performance of an innovative CaO and Fe₂O₃ based sorbent. *Fuel* 295, 120586. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120586>
- DIN, G.I. for S., 2014. 14918. Solid biofuels. Determination of calorific value.
- Empresa de Pesquisa Energética, 2021. Brazilian Energy Balance. Rio de Janeiro.
- Falciano, A., Cimini, A., Masi, P., Moresi, M., 2022. Carbon Footprint of a Typical Neapolitan Pizzeria. *Sustainability* 14, 3125. <https://doi.org/10.3390/su14053125>
- Falfán-Valencia, R., Ramírez-Venegas, A., Pérez Lara-Albisua, J.L., Ramírez-Rodríguez, S.L., Márquez-García, J.E., Buendía-Roldan, I., Gayosso-Gómez, L.V., Pérez-Padilla, R., Ortiz-Quintero, B., 2020. Smoke exposure from chronic biomass burning induces distinct accumulative systemic inflammatory cytokine alterations compared to tobacco smoking in healthy women. *Cytokine* 131, 155089. <https://doi.org/10.1016/j.cyto.2020.155089>
- Gonultas, O., Candan, Z., 2018. Chemical characterization and ftir spectroscopy of thermally compressed eucalyptus wood panels. *Maderas. Cienc. y Tecnol.* 0–0. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2018005031301>
- Gupta, P.K., Krishna Prasad, V., Sharma, C., Sarkar, A.K., Kant, Y., Badarinath, K.V.S., Mitra, A.P., 2001. CH₄ emissions from biomass burning of shifting cultivation areas of tropical deciduous forests – experimental results from ground-based measurements. *Chemosph. - Glob. Chang. Sci.* 3, 133–143. [https://doi.org/10.1016/S1465-9972\(01\)00003-4](https://doi.org/10.1016/S1465-9972(01)00003-4)
- Ielpo, P., Placentino, C.M., Genga, A., Ancona, V., Uricchio, V.F., Fermo, P., 2020. PM_{2.5} in Indoor Air of a Bakery: Chemical Characterization and Size Distribution. *Atmosphere (Basel)*. 11, 415. <https://doi.org/10.3390/atmos11040415>
- Jain, T., Sheth, P.N., 2019. Design of energy utilization test for a biomass cook stove: Formulation of an optimum air flow recipe. *Energy* 166, 1097–1105. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.180>

- Jaiswal, S., Jalbert, I., Schmid, K., Tein, N., Wang, S., Golebiowski, B., 2022. Smoke and the eyes: A review of the harmful effects of wildfire smoke and air pollution on the ocular surface. *Environ. Pollut.* 119732. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119732>
- Jones, A., 2022. The health impacts of climate change: why climate action is essential to protect health. *Orthop. Trauma* 36, 248–255. <https://doi.org/10.1016/j.mporth.2022.07.001>
- Kumar, P., de Fatima Andrade, M., Ynoue, R.Y., Fornaro, A., de Freitas, E.D., Martins, J., Martins, L.D., Albuquerque, T., Zhang, Y., Morawska, L., 2016. New directions: From biofuels to wood stoves: The modern and ancient air quality challenges in the megacity of São Paulo. *Atmos. Environ.* 140, 364–369. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.05.059>
- Li, H., Tang, M., Luo, X., Li, W., Pang, Y., Huang, W., Zhao, Z., Wei, Y., Long, T., Mehmood, T., 2022. Compositional characteristics and toxicological responses of human lung epithelial cells to inhalable particles (PM₁₀) from ten typical biomass fuel combustions. *Particuology*. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2022.09.006>
- Lima, F.D.M., Pérez-Martínez, P.J., de Fatima Andrade, M., Kumar, P., de Miranda, R.M., 2020. Characterization of particles emitted by pizzerias burning wood and briquettes: a case study at Sao Paulo, Brazil. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27, 35875–35888. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07508-6>
- Lima, J.S. de S., Silva, S. de A., Oliveira, R.B. de, Cecílio, R.A., Xavier, A.C., 2008. Temporal variability of monthly rains in Alegre – ES, Brazil. *Rev. Ciên. Agron.* 39, 327–332.
- Mahowald, N., 2011. Aerosol Indirect Effect on Biogeochemical Cycles and Climate. *Science* (80-.). 334, 794–796. <https://doi.org/10.1126/science.1207374>
- Mattos, B.D., Lourençon, T. V., Serrano, L., Labidi, J., Gatto, D.A., 2015. Chemical modification of fast-growing eucalyptus wood. *Wood Sci. Technol.* 49, 273–288. <https://doi.org/10.1007/s00226-014-0690-8>
- Mopoung, S., Dejang, N., 2021. Activated carbon preparation from eucalyptus wood chips using continuous carbonization–steam activation process in a batch intermittent rotary kiln. *Sci. Rep.* 11, 13948. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93249-x>
- Müller, G., Schöpfer, C., Vos, H., Kharazipour, A., Polle, A., 2008. FTIR-ATR spectroscopic analyses of changes in wood properties during particle- and fibreboard production of hard- and softwood trees. *BioResources* 4, 49–71. <https://doi.org/10.15376/biores.4.1.49-71>
- Oliveira, P.R.S., Trugilho, P.F., Oliveira, T.J.P., 2022. Briquettes of acai seeds: characterization of the biomass and influence of the parameters of production temperature and pressure in the physical-mechanical and energy quality. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 29, 8549–8558. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15847-6>
- Oluwoye, I., Altarawneh, M., Gore, J., Dlugogorski, B.Z., 2020. Products of incomplete combustion from biomass reburning. *Fuel* 274, 117805. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117805>
- Protásio, T. de P., da Costa, J.S., Scatolino, M. V., Lima, M.D.R., de Assis, M.R., da Silva, M.G., Bufalino, L., Dias Junior, A.F., Trugilho, P.F., 2022. Revealing the influence of chemical compounds on the pyrolysis of lignocellulosic wastes from the Amazonian production chains. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 19, 4491–4508. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03416-w>
- Ramírez-Venegas, A., Velázquez-Uncal, M., Pérez-Hernández, R., Guzmán-Bouilloud, N.E., Falfán-Valencia, R., Mayar-Maya, M.E., Aranda-Chávez, A., Sansores, R.H., 2018. Prevalence of COPD and respiratory symptoms associated with biomass smoke exposure in a suburban area. *Int. J. Chron. Obstruct. Pulmon. Dis.* Volume 13, 1727–1734. <https://doi.org/10.2147/COPD.S156409>

- Ren, X., Guo, J., Li, S., Chang, J., 2020. Thermogravimetric Analysis–Fourier Transform Infrared Spectroscopy Study on the Effect of Extraction Pretreatment on the Pyrolysis Properties of Eucalyptus Wood Waste. *ACS Omega* 5, 23364–23371. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03271>
- Sette Jr., C.R., Hansted, A.L.S., Novaes, E., Lima, P.A.F. e, Rodrigues, A.C., Santos, D.R. de S., Yamaji, F.M., 2018. Energy enhancement of the eucalyptus bark by briquette production. *Ind. Crops Prod.* 122, 209–213. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.05.057>
- Silva, J.E., Calixto, G.Q., de Almeida, C.C., Melo, D.M.A., Melo, M.A.F., Freitas, J.C.O., Braga, R.M., 2019. Energy potential and thermogravimetric study of pyrolysis kinetics of biomass wastes. *J. Therm. Anal. Calorim.* 137, 1635–1643. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08048-4>
- Simoneit, B.R., 2002. Biomass burning — a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion. *Appl. Geochemistry* 17, 129–162. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(01\)00061-0](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00061-0)
- Souza, E.C. de, Gomes, J.P.S., Pimenta, A.S., de Azevedo, T.K.B., Pereira, A.K.S., Gomes, R.M., Brito, J.O., Dias Júnior, A.F., 2022. Briquette production as a sustainable alternative for waste management in the tannin extraction industry. *Environ. Sci. Pollut. Res.* <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23490-y>
- Talib, A., Randhir, T.O., 2017. Climate change and land use impacts on hydrologic processes of watershed systems. *J. Water Clim. Chang.* 8, 363–374. <https://doi.org/10.2166/wcc.2017.064>
- Tong, S., Kong, L., Yang, K., Shen, J., Chen, L., Jin, S., Wang, C., Sha, F., Wang, L., 2020. Characteristics of air pollution episodes influenced by biomass burning pollution in Shanghai, China. *Atmos. Environ.* 238, 117756. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117756>
- United Nations, 2015. Agenda of Sustainable Development Goals 2030 [WWW Document]. URL <https://sdgs.un.org/goals> (accessed 9.17.21).
- Villeneuve, J., Palacios, J.H., Savoie, P., Godbout, S., 2012. A critical review of emission standards and regulations regarding biomass combustion in small scale units (<3MW). *Bioresour. Technol.* 111, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.061>
- Wang, J., Xi, F., Liu, Z., Bing, L., Alsaedi, A., Hayat, T., Ahmad, B., Guan, D., 2018. The spatiotemporal features of greenhouse gases emissions from biomass burning in China from 2000 to 2012. *J. Clean. Prod.* 181, 801–808. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.206>
- Wang, L., Zheng, X., Stevanovic, S., Wu, X., Xiang, Z., Yu, M., Liu, J., 2018. Characterization particulate matter from several Chinese cooking dishes and implications in health effects. *J. Environ. Sci.* 72, 98–106. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.12.015>
- WHO, 2021. Household air pollution and health [WWW Document]. URL <https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health> (accessed 6.22.22).
- Yin, S., Wang, X., Zhang, X., Guo, M., Miura, M., Xiao, Y., 2019. Influence of biomass burning on local air pollution in mainland Southeast Asia from 2001 to 2016. *Environ. Pollut.* 254, 112949. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.117>
- Zhai, J., Burke, I.T., Stewart, D.I., 2021. Beneficial management of biomass combustion ashes. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 151, 111555. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111555>

Material suplementar

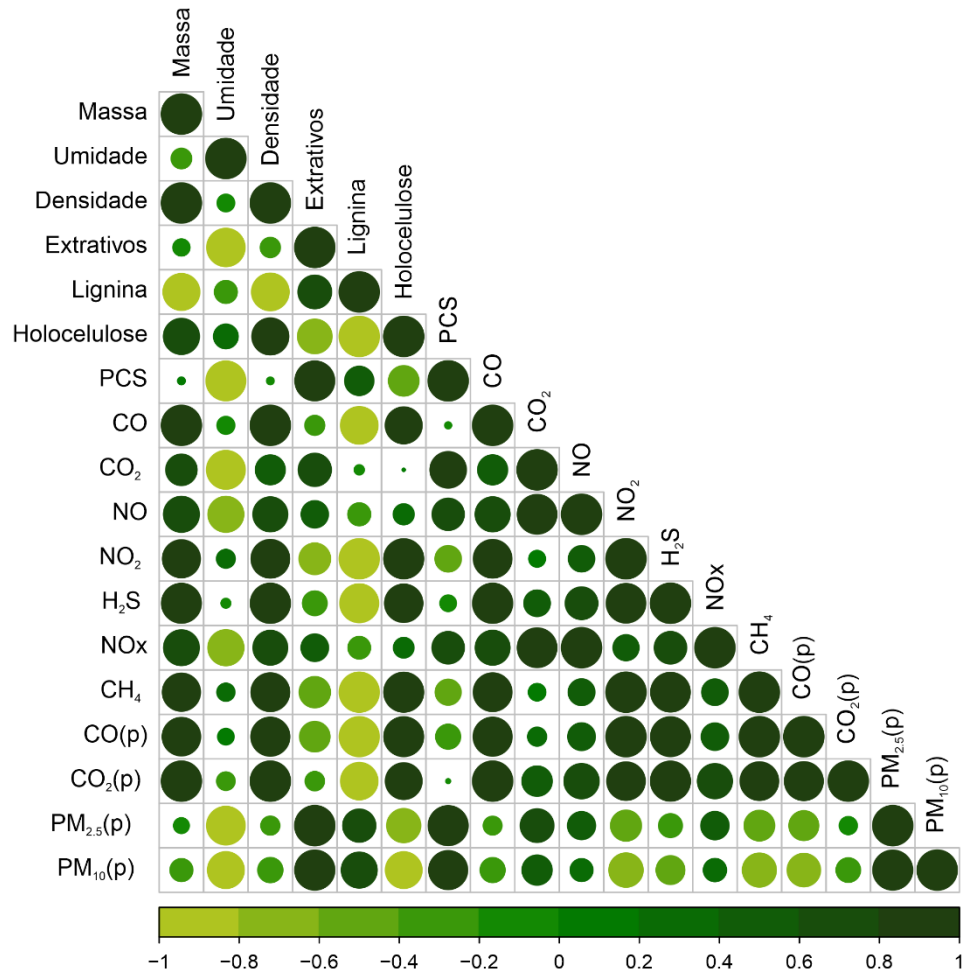


Figura 20. Matriz de correlação das propriedades da madeira e efluentes gasosos emitidos durante a queima

5. CONCLUSÕES GERAIS

No Capítulo 3, foi possível observar que, do ponto de vista técnico, o forno de alvenaria se mostra como uma alternativa sustentável para melhorar a qualidade de ar no interior das residências caso seja implementado em ambientes abertos, através da prática de cocção conjunta de alimentos em pequenas comunidades. É válido salientar que não se tem conhecimento da adoção destas práticas e que os resultados e discussões deste capítulo são o primeiro passo para possíveis implementações de estratégias que podem auxiliar estas comunidades.

No Capítulo 4, podemos constatar que há influência da qualidade da madeira, tanto nos aspectos físicos quanto químicos, na emissão de efluentes gasosos durante o processo de cocção de alimentos em fornos de pizza e estes aspectos devem ser observados no momento de selecionar a espécie mais adequada para a queima.

De maneira geral, a massa de madeira utilizada contribui de maneira significativa para a emissão de efluentes gasosos, indicando que o ideal é aliar o baixo consumo de lenha com o uso de espécies com características físico-químicas adequadas. Os dados destes estudos podem contribuir de maneira significativa para o desenvolvimento de diversas políticas públicas da área ambiental, tanto para países desenvolvidos, quanto para países em desenvolvimento.

No mais, estudos futuros devem avaliar a viabilidade econômica da construção desses fornos em pequenas comunidades, além de investirem esforços na busca por melhorias na estrutura física dos fornos, visando reduzir, ainda mais, a emissão de efluentes gasosos nocivos ao meio ambiente e aos seres humanos.