

COMPARAÇÃO DOS NÍVEIS DE POLUENTES EMITIDOS PELOS DIFERENTES COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS PARA COZÇÃO E SUA INFLUÊNCIA NO AQUECIMENTO GLOBALAdriana Gioda^{a,*}^aDepartamento de Química, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 22451-900 Rio de Janeiro – RJ, Brasil

Recebido em 19/01/2018; aceito em 06/06/2018; publicado na web em 19/07/2018

COMPARISON OF THE POLLUTANT LEVELS EMITTED BY DIFFERENT FUELS USED FOR COOKING AND THEIR INFLUENCES ON GLOBAL WARMING. Global warming is one of the most worrying environmental problems nowadays. A joint effort has been made by many countries to minimize greenhouse gas (GHG) emissions, responsible for global warming. The evidences indicate that global warming is occurring due to anthropogenic activities, mainly caused by the using of fossil or biomass fuels. Although this effect is more directly associated with external emissions, domestic emissions also have their contributions. In this way, cooking activities can have an impact on global warming, since the main fuels used for these purposes are from fossil or biomass origin. This study aimed to evaluate the impact of the most common fuels used for cooking in Brazil on global warming. Among the fuels studied and the data available to date, biogas, followed by natural gas and liquefied petroleum gas were the least polluting, even the latter two being derived from petroleum and currently considered the great villain of air pollution. The results also show that although LPG is the most used fuel (> 90%) in Brazil for cooking, firewood, which accounts for only 3% of consumption, causes the highest emission rates of greenhouse gases. Therefore, more efficient stoves can have a significant impact on the GHG reductions in the country.

Keywords: global warming; greenhouse gases; cooking fuels; indoor pollution; firewood.

INTRODUÇÃO

A biomassa foi uma das primeiras fontes de energia utilizadas pela humanidade,¹ sendo empregada desde a sua descoberta na cocção de alimentos, uma das atividades básicas do ser humano. Com o desenvolvimento tecnológico, novos combustíveis e fogões foram introduzidos para esta finalidade. Atualmente, vários combustíveis são usados para a cocção e são provenientes de biomassa ou fóssil. Biomassa é toda matéria orgânica produzida por fotossíntese, sendo esta considerada uma fonte renovável de energia.² As plantas absorvem a energia do sol e, quando queimadas, a energia química da biomassa é liberada como calor. A biomassa pode ser queimada diretamente (p. ex., lenha, restos de plantações e madeiras, palhas, etc.) ou convertida em biogás (p. ex., metano) ou biocombustíveis líquidos (p. ex., etanol) que podem ser queimados como combustíveis.² A partir da biomassa também é obtido o carvão vegetal, muito usado na cocção. Os combustíveis fósseis (petróleo, carvão mineral e gás natural, GN) são hidrocarbonetos que foram formados a partir de restos de plantas (diatomáceas) e animais há milhões de anos sob calor geotérmico e pressão.² O petróleo bruto é extraído, refinado e transformado em diferentes produtos (p. ex., gasolina, óleo diesel, combustível de aviação, matérias primas petroquímicas, ceras, óleos lubrificantes e asfalto).² O gás liquefeito de petróleo (GLP), também conhecido como gás de botijão ou gás de cozinha, composto por uma mistura dos hidrocarbonetos propano e butano, também é obtido durante o refino do petróleo ou extraído do GN. Os combustíveis fósseis mundialmente utilizados para cocção são o GLP, o GN, o carvão mineral e o querosene. O carvão mineral também é usado de forma indireta, quando a cocção é realizada utilizando a energia elétrica e esta for proveniente de termelétricas.² Estes combustíveis são agrupados em três categorias: modernos (energia elétrica e GLP), intermediários (querosene e carvão) e tradicionais (biomassa).³

Os fogões podem ser do tipo tradicional a lenha (p. ex., fogão de três pedras com queima de todo tipo de combustível sólido); fogão a lenha melhorado ou aprimorado ou ecoeficiente (pode ser feito de forma barata a partir dos recursos locais, gerando menos fumaça, menos escurecimento dos utensílios com economia de combustível) e fogões modernos ou eficientes (p. ex., fogão a gás ou a querosene, que consomem menos combustíveis e emitem menores quantidades de poluentes).

A cocção de alimentos está associada ao processo de combustão (queima), uma reação química exotérmica que libera calor e luz. Esta reação se dá entre uma substância combustível (p. ex., lenha, metano, querosene, etc.) e um gás comburente, principalmente o oxigênio.⁴ Em uma reação estequiométrica há formação apenas de dióxido de carbono (gás carbônico, CO₂) e vapor de água. No entanto, a combustão completa e ideal não é sempre possível pela falta de suprimento adequado de oxigênio, resultando na formação de outros gases e partículas. A falta de oxigênio, as impurezas presentes nos combustíveis (p. ex., S, N, Fe, V, Ni, As, Cr, Hg, Pb, Se, etc.) e os diferentes equipamentos e condições usados nos processos de queima acarretam na formação de produtos de combustão incompleta (PCIs), tais como: monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), óxidos de nitrogênio, NO_x (NO + NO₂), óxidos de enxofre, SO_x (SO₂, SO₄²⁻), compostos orgânicos voláteis (COV) e partículas variadas (fuligem ou carbono negro (do inglês, *black carbon*, BC), partículas grossas, finas e ultrafinas).⁴ O NO_x gerado durante a queima é resultante de dois processos: i) NO_x atmosférico, formado a partir da oxidação do N₂ do ar atmosférico e altas temperaturas, sendo predominante e o ii) NO_x do combustível, formado a partir da quebra das ligações do nitrogênio presente no combustível e reação com o O₂.

As partículas, chamadas de material particulado (MP, do inglês, *particulate matter*), geradas no processo de combustão se destacam por serem as mais tóxicas para a saúde e ter grande influência no clima. As partículas produzidas por fontes de combustão podem variar muito de tamanho e composição química. Estas são classificadas de acordo com seu diâmetro aerodinâmico em partículas totais em

*e-mail: agioda@hotmail.com

suspensão (PTS – até 100 μm), partículas inaláveis grossas (MP_{10} – até 10 μm) e partículas respiráveis finas ($\text{MP}_{2,5}$ – até 2,5 μm). Atualmente, diâmetros menores de partículas, chamados de partículas ultrafinas e nanopartículas ($\text{MP} < 0,1 \mu\text{m}$), estão sendo estudadas. Em geral, os componentes químicos predominantes do MP são espécies inorgânicas (sulfatos, nitratos, amônia, sais marinhos), compostos orgânicos (carbono elementar (CE), *black carbon* (BC), ácidos carboxílicos, aminoácidos, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, HPA) e metais.⁴ A lista da Agência Internacional para Pesquisa do Câncer⁵ (do inglês, *International Agency for Research Cancer*, IARC) de carcinogênicos do Grupo 1 inclui vários componentes provenientes das atividades de cocção, como COV (formaldeído e benzeno), benzo[a]pireno (BaP), um HPA, e alguns elementos (p. ex., As, Cr, Ni) presentes no MP e o próprio MP. Além disso, as emissões de combustão doméstica de carvão e lenha são consideradas misturas carcinogênicas. A categoria 1 da IARC é usada quando há evidência suficiente de carcinogenicidade em humanos.⁵

Dentre os combustíveis usados com a finalidade de cocção, a biomassa ainda é a mais empregada mundialmente. Cerca de 3 bilhões de pessoas fazem uso de combustíveis sólidos e fogões tradicionais para atender às necessidades diárias de cocção e aquecimento.⁶ Essa combinação de combustível e fogão resulta em uma combustão ineficiente com emissão significativa de PCIs. Essas substâncias contribuem diretamente para o aumento da morbidade e da mortalidade e dos poluentes climáticos de vida curta.⁷ Estima-se que a poluição do ar doméstica (do inglês, *household air pollution*, HAP) representa o quarto fator de risco global para a saúde, responsável por 4,3 milhões de mortes anualmente.⁶ Em 2010, na América Latina e Caribe, foi estimado a ocorrência de 70.000 mortes prematuras relacionadas à exposição interna ao $\text{MP}_{2,5}$ devido ao uso de combustíveis sólidos na cocção.⁸ As partículas finas são as mais diretamente associadas a mortes e doenças. No Brasil, cerca de 10 milhões de domicílios ainda fazem uso de lenha, sendo que um percentual significativo usa fogões tradicionais, mais poluentes.⁹

Os produtos e subprodutos da queima de combustíveis residenciais, além de causar danos à saúde, fazem parte das substâncias responsáveis pelo aquecimento global e pelas mudanças climáticas.¹⁰ O aquecimento global é o aumento da temperatura da superfície terrestre (terra e água) e da atmosfera. A causa do aquecimento global é a quantidade crescente de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera produzida por diversas atividades humanas.¹¹ A cocção é uma atividade que deve ser considerada no inventário dos GEE, uma vez que faz uso tanto de combustíveis fósseis quanto de biomassa e afeta diretamente nos níveis de desmatamento. Um GEE é aquele que absorve e emite radiação na faixa do infravermelho, comumente chamada de radiação térmica ou calor. O efeito do aquecimento global está sendo percebido de várias maneiras: pelo aumento da desertificação¹² maior derretimento da neve e do gelo,¹³ aumento do nível do mar,¹⁴ além de furacões e ciclones mais intensos.¹⁵

Visando a redução dos GEE, em 1997 foi criado o Protocolo de Quioto, que entrou em vigor em 2005. Na primeira fase este Protocolo teve como objetivo reduzir as concentrações de GEE em, pelo menos, 5,2% em relação aos níveis de 1990 no período entre 2008 e 2012.¹⁶ Na segunda fase, 2013-2020, os países signatários se comprometeram a reduzir as emissões de GEE em, pelo menos, 18% abaixo dos níveis de 1990.¹⁶ Em 12 de dezembro de 2015, em Paris, foi adotado um novo acordo global que busca combater os efeitos das mudanças climáticas, bem como reduzir as emissões de GEE.¹⁷ O documento, chamado de Acordo de Paris, foi ratificado pelas 195 partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) e pela União Europeia, durante a 21ª Conferência das Partes (COP21). Um dos objetivos do acordo é manter o aquecimento global muito abaixo de 2 °C, buscando ainda esforços para

limitar o aumento da temperatura a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais.¹⁷ A Política Nacional sobre a Mudança do Clima (PNMC) no Brasil faz parte da Lei no. 12.187/2009 e busca reduzir as emissões de GEE entre 36,1% e 38,9% em relação às emissões projetadas até 2020.¹⁸ O Decreto no 7.390/2010, que regulamenta a PNMC, projeta uma redução de até 1,259 Gt CO_2e para 2020 para o somatório das emissões de todos os setores.¹⁸

O Protocolo de Quioto faz referência à redução das emissões dos seis gases principais: CO_2 , CH_4 , N_2O , hidrofluorcarbonos (HFC); perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF_6).¹⁶ Apesar da contribuição significativa das emissões de *black carbon* (BC) para o aquecimento global, este poluente não faz parte do protocolo de Quioto ou de outros regulamentos do clima e não é avaliado em termos do potencial de aquecimento global. O BC é um componente do material particulado fino e consiste de carbono puro. Ele é formado através da combustão incompleta de combustíveis fósseis, biocombustíveis e biomassa. Uma fração considerável (18-42%) do BC presente na atmosfera é emitida pela queima de biocombustíveis (p. ex., lenha) residenciais em fogões tradicionais.¹⁹ Este tipo de carbono causa efeitos diretos e indiretos no clima. O efeito direto está relacionado com a absorção da luz solar, resultando no aquecimento da atmosfera e reduzindo o albedo quando depositado em neve e gelo. Portanto, o BC aquece a atmosfera de forma diferente dos GEE. O efeito indireto está relacionado à interação com as nuvens.¹⁹ O BC é considerado o segundo maior contribuinte para o aquecimento global e a redução destas emissões pode ser a estratégia mais rápida para retardar as mudanças climáticas, uma vez que a vida útil do BC é de apenas alguns dias ou semanas, enquanto que a do CO_2 é de mais de 100 anos. O uso do fogão é uma das maiores fontes antropogênicas não reguladas de aerossóis carbonáceos primários. A redução das emissões de BC, particularmente de fontes de combustão confinadas (como fogões e motores), oferece benefícios combinados para a saúde e o clima, podendo retardar o impacto do aquecimento global em aproximadamente 10 anos.²⁰ Em termos de benefícios para a saúde, é significativamente mais barato mudar as práticas de cocção do que controlar as emissões dos veículos, embora ambos os tipos de intervenções produzam benefícios semelhantes de mitigação das mudanças climáticas.²⁰ Mais de 60% das emissões de BC na América Latina e Caribe são originárias do Brasil e do México, sendo devidas principalmente ao transporte e a combustão residencial de combustíveis sólidos.⁸

Para incentivar o uso de formas de energia mais limpas, esforços governamentais e não governamentais mundiais buscam substituir combustíveis e fogões tradicionais por tecnologias menos poluentes visando reduzir a emissão e, com isso, melhorar a qualidade do ar em ambientes residenciais, proteger a saúde e minimizar os efeitos climáticos.²¹⁻²³ Atualmente, vários países estão fazendo a troca de combustíveis tradicionais, como lenha, carvão, carvão vegetal, resíduos animais para formas mais limpas de cocção, como GLP e biogás.²⁴⁻²⁷ De um modo geral, os programas conseguem atingir seus objetivos quando há introdução de subsídios, regulamentações eficientes e boas práticas comerciais.

Com base no exposto, este estudo visa estimar os níveis de GEE no país decorrentes da cocção e as taxas de emissões dos diferentes combustíveis utilizados para esta finalidade. Este estudo oferece informações relevantes para avaliar e escolher o combustível para cocção menos poluente, visando atingir as metas de redução dos GEE.

PARTE EXPERIMENTAL

Para estimar as emissões de gases de efeito estufa relativos aos combustíveis usados na cocção no país foram utilizados dados do último Balanço Energético Nacional (BEN, 2017),²⁸

preparado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME), e os cálculos sugeridos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (do inglês, *Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*)^{29,30} e usados pelo protocolo brasileiro.³¹ O cálculo foi realizado da seguinte forma:

$$tCO_2e = \text{consumo} \times \text{fator de conversão para TJ} \times \text{tonelada de gás emitida por TJ de energia} \times \text{PAG do gás}$$

onde:

tCO₂e = toneladas de CO₂ equivalente

Consumo = consumo residencial do combustível (p. ex., GLP, lenha, etc) registrado no Brasil no ano de 2016 e publicado no Balanço Energético Nacional (BEN, 2017)²⁸

Fator de conversão = conversão de toneladas para terajoule (TJ = 10¹² joules) de energia, usando os fatores citados no BEN, 2017²⁸

tonelada de gás emitida por TJ de energia = Valores padrões disponibilizados pelo IPCC 2006^{30,31}

PAG = potencial de aquecimento global para cada gás: onde o PAG do CO₂ foi considerado 1, do CH₄ 28 e do N₂O 265, valores atualizados em 2013²⁹

Como no Brasil não há estudos consistentes sobre poluição do ar doméstica causada pelos diferentes combustíveis utilizados na cocção, assim como os efeitos à saúde,⁹ para dar uma dimensão dos níveis de tais poluentes foi realizada uma busca de artigos científicos utilizando diferentes bases de dados: Web of Science, Scielo, PubMed, Google Scholar, Science Direct, entre outras, e os resultados mais relevantes foram apresentados no texto. Para isso, uma combinação de termos ou palavras foram escolhidas para obter o maior número de trabalhos publicados, dentre elas: *indoor air pollution, household air pollution, firewood, biomass, cookstove, natural gas, liquefied petroleum gas, coal, cooking fuel, cooking emission, global warming e greenhouse gases*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Emissões de gases de efeito estufa gerados pelo setor residencial no Brasil

As mudanças climáticas e o aquecimento global são causados por gases e partículas emitidos, principalmente, pelos processos de combustão usados para geração de energia. Para avaliar a influência de um determinado produto no aquecimento global é usada a medida conhecida como Potencial de Aquecimento Global, comumente chamada de “Pegada de Carbono”, (PAG, do inglês, *Global Warming Potential, GWP*).¹¹ O PAG de um gás é o impacto que ele causa no aquecimento global em relação a uma unidade equivalente de dióxido de carbono (CO₂e) durante um determinado período de tempo (normalmente, 20, 100 ou 500 anos).¹¹ Valores negativos de PAG indicam reduções líquidas no potencial de retenção de calor atmosférico e valores positivos indicam aumentos líquidos no potencial de retenção

de calor atmosférico. Por definição, ao CO₂ é atribuído um PAG de 1 para qualquer unidade de tempo.¹¹ Para outros gases, varia em função do tempo. No Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC estão os valores atualizados e são estes os recomendados para os cálculos.²⁹ Os valores do PAG para 100 anos para o CH₄ é 28 e para o N₂O é 265.²⁹ Por outro lado, o PAG do GLP é zero, ou seja, emissões diretas de GLP não contribuem para as alterações climáticas, enquanto que as do GN, cujo principal componente é o metano, são 28 vezes maiores. O GLP passa a ter efeito quando queimado, pois gera CO₂ e outros gases. Outros poluentes não têm seu PAG definido pelo IPCC, mas alguns pesquisadores sugerem valores, embora não haja concordância entres os mesmos. Por exemplo, considerando um período de 100 anos o PAG do *black carbon* global, sugerido por Bond *et al.*,³² é de 900 (120 a 1800) e o de matéria orgânica -46;³³ para COV global, Fuglestvedt *et al.*³⁴ sugeriram 4,5 e para o CO global de 2 a 3,3. O PAG é, geralmente, expresso em kg ou toneladas de CO₂e.

No Brasil, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE),³⁵ os combustíveis utilizados para cocção são: gás de botijão (GLP, 93,2%), lenha (3,2%), gás canalizado (GN, 2,9%), carvão (0,7%), energia elétrica (0,05%) e outro tipo de combustível (p. ex., querosene e biogás, 0,004%). De uma forma mais abrangente, o Balanço Energético Nacional (BEN, 2017),²⁸ ano base 2016, apontou que as três principais fontes de energia usadas com fins residenciais, porém com diferentes finalidades, são a eletricidade (46,0%), seguida pelo GLP (26,5%) e a lenha (24,4%). As demais fontes representaram pouco na matriz energética residencial: carvão vegetal (1,7%), GN (1,4%) e querosene (0,0%). Com base nos fatores de emissão apresentados pelo IPCC e no consumo de combustível registrado no último Balanço Energético Nacional, 2016, foram calculadas as taxas de emissões para os três principais gases de efeito estufa (Tabela 1).

Com base nos resultados, os combustíveis sólidos, como a lenha e o carvão vegetal, apresentaram as maiores taxas de emissão de GEE, como já observado em outros estudos.^{36,37} Embora o consumo de lenha, em terajoule, seja da mesma magnitude ao do GLP, a emissão de GEE foi duas ordens de grandeza maior. Da mesma forma que o carvão vegetal, que teve seu consumo em uma ordem de grandeza menor que o GLP, mas emitiu a mesma proporção de GEE. De acordo com a avaliação do governo, a predominância do uso do GLP no país (> 90%) tem influenciado na redução da emissão de GEE.³⁸ Um dos fatores determinantes para o aumento da eficiência energética tem sido a substituição gradativa da lenha e do carvão vegetal pelo GLP no preparo de alimentos.³⁸

Estudos têm mostrado que fogões a lenha tradicionais emitem grandes quantidades de GEE, com valores de PAG que podem variar em até 10 vezes de acordo com as combinações de fogão e combustíveis.³⁶ Por outro lado, fogões a GLP e querosene apresentaram os menores valores de PAG, sendo até mais limpos que fogões a lenha eficientes que utilizam biomassa renovável. Com base nestes estudos, muitos pesquisadores acreditam que as opções de combustíveis fósseis podem ser as mais adequadas, tanto para a saúde, quanto para as mudanças climáticas.^{36,37}

Tabela 1. Estimativa das taxas de emissão dos principais gases de efeito estufa (CO₂, CH₄ e N₂O), para 100 anos, devido à cocção no Brasil. Ano Base, 2016

	Consumo em 2016	Fator de conversão para TJ	Consumo (TJ)	Porcentagem (%TJ)	tonelada de gás por TJ			tCO ₂ e			
					CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total
GLP	10,758 x 10 ⁶ m ³	0,02526	2,72 x 10 ⁵	48,6	63,1	5	0,1	1,71 x 10 ⁷	3,80 x 10 ⁷	7,20 x 10 ⁶	6,24 x 10⁷
Lenha	19,561 x 10 ⁶ t	0,01298	2,54 x 10 ⁵	45,5	119,9	300	4	3,04 x 10 ⁷	2,13 x 10 ⁹	2,69 x 10 ⁸	2,43 x 10⁹
Carvão vegetal	6,64 x 10 ⁵ t	0,02705	1,80 x 10 ⁴	3,2	101,4	200	1	1,82 x 10 ⁶	1,01 x 10 ⁸	4,76 x 10 ⁶	1,07 x 10⁸
GN	4,05 x 10 ⁸ m ³	0,00003684	1,49 x 10 ⁴	2,7	56,1	5	0,1	8,37 x 10 ⁵	2,09 x 10 ⁶	3,95 x 10 ⁵	3,32 x 10⁶
Querosene	3,0 x 10 ³ m ³	0,0344	1,03 x 10 ²	0,02	71,9	10	0,6	7,42 x 10 ³	2,89 x 10 ⁴	1,64 x 10 ⁴	5,27 x 10⁴

O somatório anual das emissões de lenha, carvão vegetal e querosene no Brasil correspondem a $2,54 \times 10^9$ t de CO_2e . Se estes combustíveis fossem substituídos por GLP o total das emissões seria de $6,24 \times 10^7$ t de CO_2e , ou seja, haveria uma redução significativa na emissão de GEE. Considerando o preço médio por t CO_2e de US\$ 15 e apenas os GEE, a troca de fogão e combustível pode gerar receitas de US\$ 15 a US\$ 90 por fogão por ano. Os custos médios anuais relativos aos diferentes combustíveis foram estimados em US\$ 20 - US\$100 para GLP, US\$ 10 - US\$ 20 para o querosene, e US\$ 3 a US\$ 24 para fogões a lenha.³⁹ Há, portanto, grande potencial de financiamento de carbono para custear a transição de métodos de cocção tradicionais, com alto potencial emissor, por métodos mais limpos. Se forem considerados outros poluentes, como BC, que tem impactos de curto prazo seria ainda mais evidente as benfeitorias da troca de fogões.³⁶

A Tabela 2 apresenta os valores das emissões de GEE para outro estudo realizado com dados brasileiros de 2014.¹⁸ Os resultados apontam uma diferença significativa quando se incluem as emissões de biomassa. A Tabela 3 compara os diversos setores no país que usam biomassa e combustíveis fósseis como fontes de energia, as mesmas usadas na cocção. Neste caso, não foram incluídos gasolina, óleo diesel ou eletricidade por não terem relação com as formas de cocção. A lenha, mais uma vez, teve grande destaque, não somente no setor residencial, como agropecuário e industrial.

Estimativas mundiais de gases de efeito estufa gerados pela cocção

Muitas pesquisas têm sido realizadas para estimar os fatores de emissão dos combustíveis e assim avaliar seu impacto no aquecimento

global. Por exemplo, Smith e colaboradores^{39,40} estimaram os fatores de emissões dos poluentes mais importantes em 28 combinações de combustível utilizados em fogão comum. Os resultados do estudo mostraram que a maioria dos biocombustíveis conduz a maiores impactos no aquecimento global do que os combustíveis fósseis comuns (GLP e querosene), porque as características de má combustão levam a um aumento das emissões de produtos de combustão incompleta. Bailis *et al.*⁴¹ avaliaram os impactos das emissões de GEE e partículas provenientes da queima de lenha, carvão vegetal, GLP e querosene utilizados com fins domésticos (Tabela 4).

De acordo com os resultados obtidos, cada refeição preparada com carvão vegetal tem um efeito de 2 a 10 vezes maior no aquecimento global do que quando preparadas com lenha; e de 5 a 16 vezes maior quando comparada com querosene ou GLP (Tabela 4). Estes resultados são influenciados pelo número de gases incluídos na estimativa e o grau em que a lenha usada é de reflorestamento. Outro estudo incluiu, além dos gases, o BC, para diferentes combustíveis (Tabela 5).⁴² De acordo com a Tabela 5, tanto o PAG do carvão quanto o da lenha são alterados substancialmente quando o BC é incluído. Por outro lado, a contribuição do BC pelo GLP é insignificante.

Um estudo mais abrangente foi realizado por Singh e colaboradores,⁴³ os quais investigaram o desempenho ambiental de vários combustíveis domésticos, tais como GLP (obtidos do GN e do petróleo), querosene, carvão, eletricidade, lenha, carvão vegetal e biogás desde a produção até seu uso. A Figura 1 mostra as emissões totais destes combustíveis.

Considerando o total de gases e partículas emitidos por energia gerada, o GLP e o biogás foram os que apresentaram as menores taxas

Tabela 2. Comparação das emissões dos principais gases de efeito estufa emitidos em atividades residenciais durante o ano de 2014 e 2016 no Brasil

	Toneladas (t)					
	2016* [#]			2014**		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Total (combustíveis fósseis)	1,80x10 ⁷	1,43 x10 ⁶	2,87 x10 ⁴	1,80 x10 ⁷	2,44 x10 ⁵	2,72 x10 ³
Total (biomassa + fóssil)	5,03 x10 ⁷	8,12 x10 ⁷	1,06 x10 ⁶			

* – combustíveis fósseis – somatório do GLP, GN, querosene e gás canalizado – este estudo. # – todos os combustíveis deste estudo - somatório do GLP, GN, querosene, gás canalizado, lenha e carvão vegetal. ** - combustíveis fósseis – não definidos – Brasil, 2016.¹⁸

Tabela 3. Comparação das estimativa das taxas de emissão de gases de efeito estufa devido à cocção e outros setores no Brasil, em toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂e). Ano Base, 2016

Combustível	Residencial	Comercial	Agropecuária	Transportes	Indústria
GLP	6,24x10 ⁷	3,76 x10 ⁶	1,74 x10 ⁵	-	9,69 x10 ⁶
Carvão vegetal	1,07 x10 ⁸	2,10 x10 ⁷	1,94 x10 ⁶	-	7,52 x10 ⁸
GN	3,32 x10 ⁶	1,65 x10 ⁶	-	1,48 x10 ⁷	8,86 x10 ⁷
Querosene	5,27 x10 ⁴	-	-	7,06 x10 ⁷	3,51 x10 ⁴
Lenha	2,43 x10 ⁹	3,59 x10 ⁷	1,05 x10 ⁹	-	2,90 x10 ⁹
Total	2,61 x10 ⁹	6,23 x10 ⁷	1,05 x10 ⁹	8,55 x10 ⁷	3,75 x10 ⁹

Tabela 4. Ciclo de vida das emissões de gases de efeito estufa para uma variedade de combinações de combustíveis expressos em termos de g-C (unidades equivalente de CO₂) por MJ⁻¹ liberadas⁴¹

Combustível	Gases do Protocolo de Quioto (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)		Todos os gases (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, CO, hidrocarbonetos, exceto metano)	
	Renovável	Não renovável	Renovável	Não renovável
	GLP	44,5	44,5	53,2
Querosene	45,6	45,6	55,3	55,3
Eucalipto em fogão aberto	23,8	178,2	28,9	244,6
Eucalipto em fogão de cerâmica	27,4	119,0	34,7	174,8
Carvão vegetal	215,3	470,6	485,6	867,5

Tabela 5. Potencial de aquecimento global (PAG) por um período de 20 anos incluindo o *black carbon* (BC) para diferentes combustíveis usados na cocção⁴²

Combustível	gCO ₂ e / MJ (PAG 20)		
	Gases de efeito estufa	BC e outros gases	Total
GLP	140	1	141
Carvão vegetal processado	291	62	353
Lenha – carbono neutro	43	725	768
Lenha – carbono não neutro	431	725	1156
Carvão vegetal não processado	1154	5040	6194

de emissão desde a produção até seu uso e as menores emissões de GEE (CO₂ e CH₄).

Todos os combustíveis utilizados para cocção, disponíveis até o momento, emitem, por menor que seja, poluentes para o ar. A lenha, para fins de cocção, é considerada uma fonte de energia renovável. Se a lenha for de reflorestamento, o PAG pode ser reduzido em até 88%.⁴³ Porém, estudos mostram que a taxa de desmatamento, para esta finalidade, é maior que a taxa de reflorestamento.⁴⁴ Atualmente, mais de 90% da lenha utilizada nas atividades domésticas mundiais é proveniente de fontes não renováveis, portanto, o uso deste combustível nas atividades culinárias contribui significativamente para o impacto no aquecimento global.⁴³

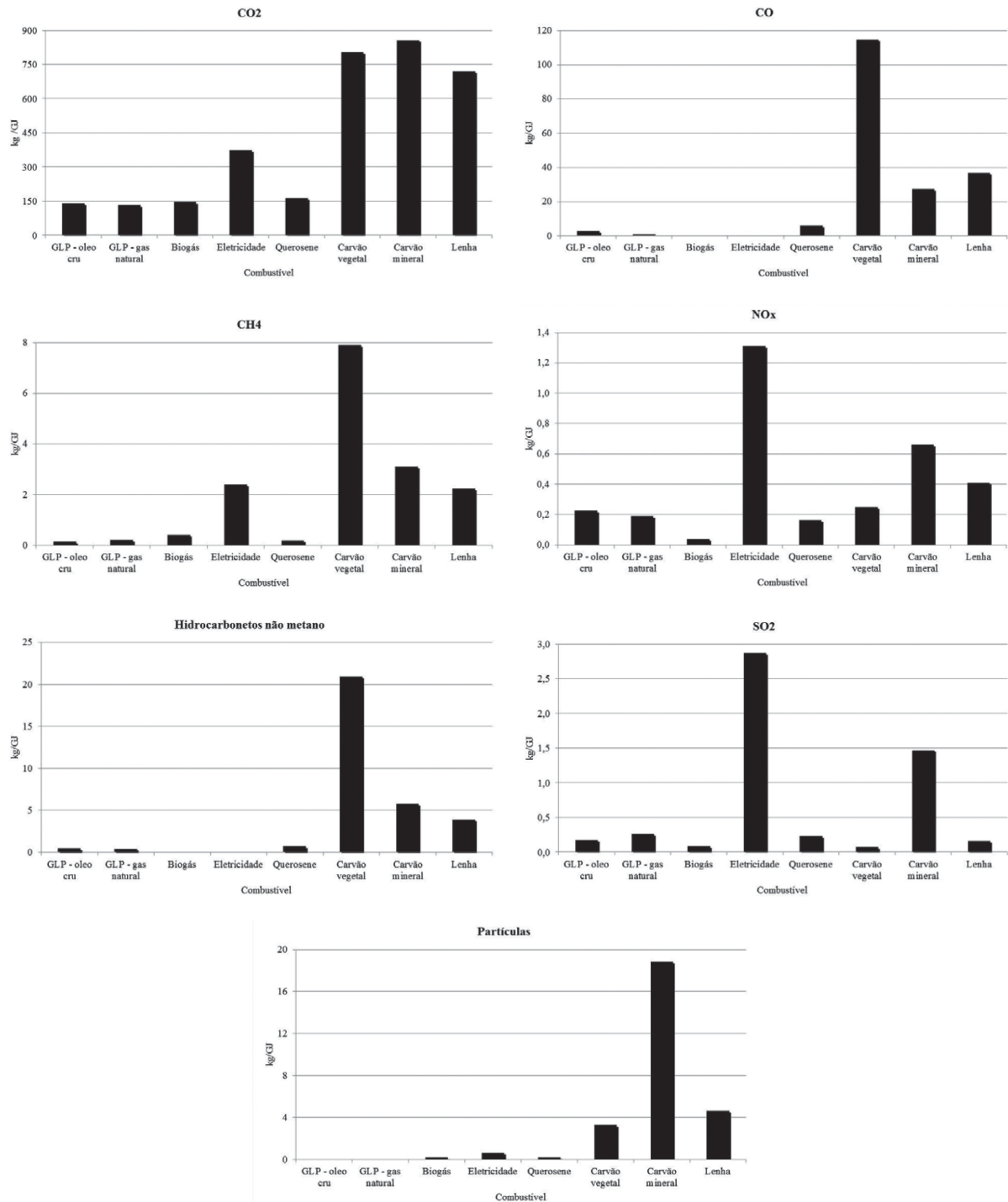


Figura 1. Taxas de emissão total de poluentes desde a produção até a combustão por energia gerada (kg GJ⁻¹) para os diferentes combustíveis usados na cocção⁴³

Por outro lado, o GN, considerado um combustível menos poluente, apresenta grandes problemas de vazamento durante o processo de extração, compressão e armazenamento.⁴⁵⁻⁴⁷ Medidas de campo mostraram que as emissões de metano “fugitivo” durante estes processos variam de 1 a 9% do total das emissões do ciclo de vida. Em estações de compressão e instalações de armazenamento as taxas de vazamento variaram de 0,7 a 4,5 kg h⁻¹, ao passo que as perdas variaram de 4,3 a 23,8 kg h⁻¹. Usando uma estimativa de 100 anos, as emissões de CO₂e para estes locais resultarão em mais de 24.000 toneladas por ano. Há também emissões de GN residencial causadas por vazamentos e uso de equipamentos. Nos EUA foi estimado que 500.000 toneladas métricas de CO₂e vazam anualmente das residências.⁴⁸ Estas fontes são responsáveis por cerca de 2% das emissões de metano doméstico.⁴⁸ Esses vazamentos de metano podem diminuir boa parte dos benefícios climáticos do uso de GN em relação aos demais combustíveis.

A facilidade de acesso à energia elétrica, bem como as novas tecnologias, tem favorecido o aumento no uso de fogões elétricos. No Brasil, o uso de eletricidade para a cocção ainda é limitado (0,05%),³³ sendo bem maior em países industrializados. Estudos mostram que a emissão de poluentes para os ambientes internos gerados pelo uso de eletricidade é menor que para muitos outros combustíveis usados para cocção.⁴⁹⁻⁵¹ Isto se deve pelo fato de que todos os impactos ambientais causados pela eletricidade resultam da fase de produção, uma vez que o uso para cocção não envolve nenhuma combustão química. Como pode ser observado na Figura 1, os níveis de SO₂ e NO_x foram mais elevados para a eletricidade do que para todos os outros combustíveis usados na cocção, além da emissão de quantidades significativas de GEE (CH₄ e CO₂). Estas emissões se devem, principalmente, pelo fato da energia ser gerada utilizando combustíveis fósseis. Por outro lado, a produção de energia elétrica gerada por hidrelétricas, embora considerada uma fonte limpa por não emitir poluentes para a atmosfera, acarreta grandes danos ao meio ambiente. Para a construção de hidrelétricas é necessário inundar imensas áreas, destruindo rios, matas, flora, fauna e interferindo na ocupação humana.^{52,53} Com isso, a degradação da biomassa destruída libera grandes quantidades de metano e causa a rarefação da camada de ozônio.⁵²

Na Indonésia, em torno de 46% dos domicílios usam GLP para cocção, 39% lenha em fogões tradicionais, 12% querosene e 3% carvão.²⁶ Neste país houve um incentivo governamental para trocar o querosene pelo GLP. Esta troca resultou em uma redução significativa de GEE (31%) e de poluentes tóxicos (COV, SO₂, NO_x, CO e partículas) (40%), sendo esperada uma redução ainda maior até o final do programa.²⁶

Em Gana, aproximadamente 73% da população ainda faz uso de combustíveis sólidos para a cocção, que resultam na morte prematura de aproximadamente 13 mil pessoas anualmente.⁵⁴ Neste país, diferentes modelos de fogão são usados para a queima de combustíveis sólidos, com diferentes taxas de emissões. Os resultados do estudo mostraram que usando fogão a carvão Gyapa (fogão com revestimento cerâmico com eficiência de queima 50% maior) o impacto no aquecimento global poderia ser reduzido em cerca de 75% em comparação à lenha.⁵⁴

Em países pobres, principalmente em áreas rurais, é comum o uso de esterco como combustível para a cocção.^{27,55} A queima de esterco gera o aumento dos níveis de poluentes, tais como N₂O e MP, tendo impacto direto na saúde dos ocupantes, além de aumentar os níveis externos de GEE. O esterco pode ser melhor aproveitado se for usado para a produção de biogás e o resíduo pode ser usado como fertilizante. Estudos realizados no interior da Etiópia mostraram que a substituição de esterco por sistemas de biogás reduziu significativamente os níveis de GEE.²⁷ Em outro estudo realizado em Bangladesh utilizando esterco como fonte de biogás, o PAG global do digestor

resultante foi zero e dos materiais de construção foi inferior a 1%.⁵⁵ Quando o biogás foi usado como combustível para cozinhar, o PAG foi reduzido em 83% em comparação com o uso de biomassa.⁵⁵ No Brasil, um estudo realizado no Semiárido estimou as emissões de GEE a partir da simulação de antes e depois da implantação de biodigestor em residências rurais da agricultura familiar.⁵⁶ O uso de biodigestor apresentou uma redução significativa das emissões de GEE quando comparado com outras fontes energéticas. Além disso, terá a longo prazo outros benefícios, como a redução do desmatamento da Caatinga, aliando a sustentabilidade econômica com a conservação dos recursos naturais.⁵⁶

Embora haja um incentivo para substituir fogões tradicionais por fogões a GLP, devido à queima mais limpa, é importante que a produção de fogões tenha um protocolo bem definido que deve ser seguido por todos os fabricantes, pois produções inadequadas podem acarretar em emissões indesejadas.¹⁰ Além do modo de produção e uso, a composição do GLP também influencia. Fogões bem projetados podem mitigar de 1,5 a 3,6 toneladas de CO₂e, reduzindo assim as emissões de GEE.⁵⁷

Comparação dos níveis de emissão dos combustíveis

Os tipos de fogões e combustíveis usados para cocção influenciam diretamente na qualidade do ar de uma residência e nas taxas de emissão de poluentes. O desempenho de um fogão é caracterizado pela eficiência de combustão, ou seja, a energia armazenada no combustível convertido a calor e a eficiência de transferência de calor para a panela que é influenciada pelo modelo do fogão.⁴³ Em termos de eficiência energética, os fogões a combustíveis sólidos apresentam uma eficiência entre 13 e 17%, o de querosene 47%, biogás 55%, GLP 57% e eletricidade 70%.³⁹ Atualmente, além da alta eficiência térmica, um fogão adequado deve produzir menos gases poluentes e partículas durante sua utilização. A Tabela 6 apresenta uma comparação entre o poder calorífico dos diferentes combustíveis usados na cocção e faz uma comparação com o GLP.

Tabela 6. Poder calorífico dos diferentes combustíveis utilizados na cocção e a comparação com o GLP⁵⁸⁻⁶⁰

Quantidade	Combustível	1 kg de GLP corresponde a:	Poder Calorífico (Kcal)
1 kg	GLP	-	11.500
1 kg	Querosene	1,4 L	10.400
1 m ³	GN	1,22 m ³	8.600
1 kg	Biogás	2,20 m ³	8.450
1 kg	Carvão vegetal	2,30 kg	6.400-6.700 (depende da procedência)
1 kg	Carvão mineral	2,30 kg	3.000-5.000 (depende da procedência)
1 kg	Lenha	3,96 kg	2.700-4.100 (depende do tipo e se está seca)
1 kW	Energia elétrica	13,37 kW h-1	860

De acordo com a Tabela 6, o GLP apresenta o maior poder calorífico quando comparado com os demais combustíveis usados para cocção, o que significa que necessita de uma quantidade menor de combustível para atingir o mesmo resultado em termos energéticos.

Devido à queima incompleta dos combustíveis utilizados para cocção, diferentes poluentes são emitidos tanto para os ambientes

internos quanto externos. Alguns estudos estimaram fatores de emissão por quantidade de energia útil produzida por combustível (Tabelas 7 e 8), enquanto outros fizeram medidas *in loco* dos níveis de poluentes gerados (Tabela 9). Os fatores de emissão (FE) são uma métrica que quantifica a magnitude das emissões normalizadas pelo combustível ou energia consumida. A massa indica a emissão de um poluente por unidade de combustível seco que é consumido (g poluente por kg de combustível) e a energia indica as emissões de poluentes por unidade de energia combustível durante a combustão em base líquida calorífica (g MJ⁻¹ ou kg TJ⁻¹) de emissão.⁵⁴

Com base nos estudos das Tabelas 7 e 8, é possível observar que os fatores de emissão variam muito de acordo com a tecnologia e combustíveis empregados, além do sistema de ventilação. De um modo geral, as emissões de combustíveis considerados modernos (querosene e GLP) são menores frente aos demais combustíveis (lenha e carvão) com relação a partículas (PTS, *black carbon* e MP_{2,5}) e alguns gases (CO, CH₄, carbono orgânico). Por outro lado, a lenha e o carvão emitem menos CO₂ e hidrocarbonetos excluindo o metano (HCNM).

Vários estudos *in loco* têm sido realizados para avaliar os níveis de poluentes emitidos pelos diferentes combustíveis usados na cocção (Tabela 9). Muitos destes estudos fazem comparação entre os diferentes combustíveis e fogões. A maioria das pesquisas tem sido realizada em países da África e da Ásia, onde o uso de combustíveis sólidos é uma das principais causas de mortes prematuras. No Brasil, ainda não há pesquisas consistentes. Os estudos mostram que níveis de PTS tão elevados quanto 18.300 µg m⁻³ foram obtidos durante a cocção em fogões que utilizavam combustíveis sólidos.^{44,61,62} O fogão a lenha tradicional (3.764 µg m⁻³) emitiu mais PTS que o fogão a lenha eficiente (1.942 µg m⁻³). O mesmo comportamento foi observado para o fogão tradicional a carvão vegetal (823 µg m⁻³) e o fogão eficiente a carvão vegetal (316 µg m⁻³), como era esperado.^{44,61,62} Embora ocorra uma redução, os níveis de PTS continuam elevados mesmo com os fogões mais eficientes. Com relação às partículas inaláveis grossas (MP₁₀), as maiores concentrações foram medidas para a lenha (3.764 µg m⁻³) e as menores para o GLP (133 µg m⁻³) e eletricidade ou GN (67 µg m⁻³).⁵⁰ As concentrações de MP_{2,5} foram

maiores em fogões que utilizavam casca de arroz (759 µg m⁻³) e fogões a lenha (630 µg m⁻³) do que para fogões elétricos (80 µg m⁻³), a GLP (101 µg m⁻³) ou a querosene (169 µg m⁻³).⁵¹ Concentrações de MP_{2,5} tão altas quanto 11.000 µg m⁻³ foram medidas em fogões a lenha tradicionais enquanto que tão baixas quanto 4,69 µg m⁻³ para o GLP.⁶³ Os níveis de MP_{2,5} nas residências que usam combustíveis sólidos também foram influenciados pela estação do ano, sendo geralmente mais baixas no verão (80 µg m⁻³) do que no inverno (169 µg m⁻³) e também maiores na estação chuvosa que nas demais, ultrapassando 100 µg m⁻³.^{64,65} Já para residências que usavam outro tipo de combustível, a qualidade do ar externo teve maior influência. Nos EUA, desde 1992, somente dispositivos à lenha certificados podem ser comercializados. Com isso, reduções médias de partículas finas superiores a 50% podem ser alcançadas.⁶⁶ Os níveis de gases também são influenciados pelo tipo de fogão e combustível. As concentrações de CO durante o cozimento variaram de 0,44 ppmv a 693 ppmv, sendo as mais baixas registradas para o GLP e GN. Com relação ao NO_x as concentrações mais elevadas foram medidas para os combustíveis sólidos (10 ppmv).

No Brasil, estudos comparando as emissões causadas por GLP e lenha são escassos. Em um destes estudos foram avaliados os níveis de HPA, PTS e NO₂ em cozinhas com fogões a lenha e a GLP.⁶⁷ As concentrações de HPA e PTS foram mais elevadas nas cozinhas que utilizavam lenha, porém, as concentrações de NO₂ na cozinha, bem como a exposição pessoal, foram ligeiramente mais elevadas em casas com fogões a GLP.⁶⁷ Um outro estudo mostrou que a concentração média de MP_{2,5} durante o período de cocção nas residências que usavam GLP foi bem menor (3,0 ± 3,6 µg m⁻³) que nas residências que queimavam lenha na parte externa (151,1 ± 114,8 µg m⁻³) ou interna (230,0 ± 157,0 µg m⁻³) da casa.⁶⁸ Os estudos realizados no país com fogões melhorados (ecoeficientes) mostraram que os níveis de CO não excederam 20 mg m⁻³, porém níveis tão altos quanto 3.000 µg m⁻³ para MP_{2,5} e 1.400 µg m⁻³ para MP₁₀ foram medidos.^{69,70} Mesmo as soluções melhoradas de fogões podem resultar em níveis altos, principalmente de partículas, sendo muito maiores que os valores sugeridos pela Organização Mundial da Saúde (OMS). A OMS recomenda que

Tabela 7. Fatores de emissão de partículas totais em suspensão (PTS), material particulado fino (MP_{2,5}) e monóxido de carbono (CO) por tipo de combustível utilizado na cocção^{39,44,54}

Combustível	PTS		CO		MP _{2,5}		CO ₂	
	g MJ ⁻¹	g kg ⁻¹	g MJ ⁻¹	g kg ⁻¹	g MJ ⁻¹	g kg ⁻¹	kg TJ ⁻¹	g kg ⁻¹
GLP	0,0209	0,514	0,6076	15,0	-	-	-	-
Querosene	0,0239	0,516	0,8186	18,0	-	-	-	-
Carvão vegetal	0,5277	2,375	24,19	66,5	0,02	0,47	117.440	3.306
Lenha/fogão tradicional	0,3776	1,038	61,13	275,0	0,43	7,74	119.550	3.767

Tabela 8. Fatores de emissão médios (em grama de carbono por kilograma de combustível, g C kg⁻¹) para diversos tipos de fogões e combustíveis³⁶

Características do fogão	g C kg ⁻¹							
	CO ₂	CO	CH ₄	HCNM	OC	EC	SO ₂	MP _{2,5}
Fogão a lenha (tradicional) - sem ventilação - lareira ou fogão de barro	418	35	4,8	3,2	4	1,5	0,01	8,5
Fogão a lenha, Índia (melhorado) - sem ventilação - metal	419	29	2,9	8,5	1	1,2	0,01	2,9
Fogão a carvão vegetal, Índia - sem ventilação - metal	685	30,3	7,7	2,4	3,1	4,4	0,15	8,7
Fogão a carvão mineral, China - sem ventilação - metal	736	40,9	2,6	1,3	1,5	2,1	0,88	4,1
Fogão a carvão mineral, China - com ventilação - metal	1113	205,7	46,5	63,5	8	2,3	0,01	0,4
Fogão a querosene (pavio), Índia - sem ventilação - metal	825	7,6	0,2	12,8	0,1	0,5	0,03	0,5
Fogão a GLP, Índia - sem ventilação - metal	841	6,4	0	14,1	0,1	0,2	0	0,5

HCNM: Hidrocarbonetos excluindo o metano; OC: carbono orgânico; EC: carbono elementar.

os níveis de CO não ultrapassem 10 mg m⁻³ para 8 h de exposição e para MP₁₀ 50 µg m⁻³ e MP_{2,5} 25 µg m⁻³ para 24 h.⁶

Os estudos apontam que o GLP e o GN são menos poluentes

que a biomassa. Os níveis de poluentes decorrentes da queima de biomassa dependem das suas características, assim como do tipo de fogueiro usado e da ventilação.

Tabela 9. Concentração dos poluentes emitidos pela queima dos diferentes combustíveis utilizados na cocção encontrados na literatura

Poluentes	GLP	Lenha	Combustíveis sólidos (esterco, palhas)	Querosene	GN	Eletricidade	Carvão	Ref.
PTS (µg m ⁻³)		1.942-3.764 15.800	18.300				316-823 5.500	44,61,62
	71	108		154-1.499				71
		155 mg m ⁻³	225 mg m ⁻³ (esterco)	12 mg m ⁻³			30 mg m ⁻³	67 72
	218(±88)	275(±199) 836(±310) fogo aberto						49
	50	300	4.700-58.600					73
MP ₁₀ (µg m ⁻³)	133(±48)	647(±286)-1086(±86)	202(±293)			67(±33)		74
		717	1.830 (esterco)					50
		3.764(±714)					465(±387)	49,75
	210(±100)	186(±89) 717(±285) fogo aberto						41 49
		1.400						69
MP _{2,5} (µg m ⁻³)	101	630	759	169		80		51
	25,7	222,7	376-774					63
	160				119			76
		528	488(±875)			90(±121)		49,50
		80 (verão) 169 (inverno) 100 (chuva)						64,65
	3,0(±3,6)	151(±115) 230(±157)						68
		35-200 (3.000)						70
57(±19)	96(±66) 528(±248) fogo aberto						49	
HPA (µg m ⁻³)	1.481 (HPA)	4.672 (HPA)	4.047	2.442			3.422	72
	52 (BaP)	299 (BaP)						
	3,55 ng m ⁻³	36,20 ng m ⁻³						67
Aldeídos (ppb)					15 ppb (formaldeído) 7 ppb (acetaldeído)			77
Gases	6 ppmv (CO)	43 ppmv (CO) 7 ppmv (NO ₂)	167-693 ppmv (CO)		19,5-54 ppmv (CO)			76
			10 ppmv (NO ₂)					
	0,44 ppmv (CO)	17,25 ppmv (CO)	19,34-33,50 ppmv (CO)					63
					1,1-2,5 ppmv (CO)			77
					12-15 ppbv (NO ₂)			
					41-42 ppbv (NO _x)			
	17,20 ppbv (NO ₂)	14,57 ppbv (NO ₂)						67
4,5 mg m ⁻³ (CO)	150 mg m ⁻³ (CO)	464 mg m ⁻³ (CO) (esterco) 241 mg m ⁻³ (CO) - colheita	9,4 mg m ⁻³ (CO)	0,083 mg m ⁻³ (CO)		528 mg m ⁻³ (CO) (vegetal) 178 mg m ⁻³ (CO) - mineral	78	
1,3(±0,6) (CO) ppmv	1,3(±0,7) (CO) 5,9(±2,1) (CO) ppmv fogo aberto						49	
0,1 ppmv (CO)	2,9 ppmv (CO)						73	

CONCLUSÕES

A cocção de alimentos está entre as principais atividades diárias do ser humano. O desenvolvimento tecnológico tem aperfeiçoado os fogões (a gás, elétrico, micro-ondas, etc), e novos combustíveis têm sido usados. No Brasil, o combustível mais usado é o GLP (> 90%), seguido pela lenha (3%).

Como em todo processo de combustão, há geração de gases e partículas, como produto ou subprodutos, que são lançadas no ar interno e externo. Os resultados deste estudo apontam que as emissões e os níveis de exposição são maiores para os fogões tradicionais que usam combustíveis sólidos.

Quando estes fogões são aprimorados ou melhorados o nível de emissão diminui, mas ainda são superiores as emissões de combustíveis considerados modernos (querosene e GLP).

No que concerne ao impacto ambiental, os combustíveis usados para cocção têm também impacto no aquecimento global. Comparando o desempenho ambiental de vários combustíveis domésticos, o combustível que apresentou o menor impacto ambiental em toda a cadeia foi o biogás, seguido do GLP, querosene e carvão vegetal.

Com base no consumo da população brasileira, a lenha é a maior responsável pela emissão de gases de efeito estufa seguida pelo carvão vegetal.

Como a queima de combustível com fins residenciais, assim como o tipo de fogão utilizado, influencia tanto no bem estar dos ocupantes, quanto no meio ambiente (mudanças climáticas e aquecimento global), uma forma de mitigar as emissões de carbono e os problemas de saúde é a substituição de fogões tradicionais por fogões mais eficientes. Fogões com queima mais eficiente podem ser usados como base para projetos de redução de carbono, reduzindo a emissão de CO₂ e de alguns produtos da combustão incompleta (BC, CH₄ e N₂O).

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela Bolsa de Produtividade e à FAPERJ pela auxílio Cientista do Nosso Estado.

REFERÊNCIAS

- Dermibas, A.; *Prog. Energy Combust. Sci.* **2004**, *30*, 219.
- Energy Explained, Your Guide To Understanding Energy - Energy Information Administration*; www.eia.gov, acessada em junho 2018.
- The challenge for rural energy poverty in developing countries*, WEC/FAO: Londres, 1999, p. 199.
- Russel, A. Em *Air pollution and cancer*; Straif, K., Cohen, A., Samet J., eds.; IARC Scientific Publications, 161, 2013, cap. 4.
- International Agency for Research Cancer; *List of IARC Group 1 carcinogens*. http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/latest_classif.php, acessada em junho 2018.
- World Health Organization; *Burning Opportunity: Clean Household Energy for Health, Sustainable Development, and Wellbeing of Women and Children*; WHO: Geneva, 2016.
- Ramanathan, V.; Carmichael, G.; *Nat. Geosci.* **2008**, *1*, 221.
- United Nations Environment Programme and Climate and Clean Air Coalition; *Integrated assessment of Short-lived climate pollutants in Latin America and the Caribbean*. DEW/1969/NA, 2016. ISBN: 978-92-807-3549-9.
- Gioda, A.; Tonietto, G. B.; Ponce de Leon, A.; *Ciências e Saúde Coletiva*, 2017, disponível em <http://www.cienciasaudecoletiva.com.br/artigos/exposicao-ao-uso-da-lenha-para-coccao-no-brasil-e-sua-relacao-com-os-agrivos-a-saude-da-populacao/16532?id=16532>, acessada em junho 2018.
- Shen, G. F.; Hays, M. D.; Smith, K.R.; Williams, C.; Faircloth, J. W.; Jetter, J. J.; *Environ. Sci. Technol.* **2018**, *52*, 904.
- IPCC; *Summary for Policymakers*. Cambridge University Press: Cambridge, 2013.
- DARA; *Climate vulnerability monitor 2010 the state of the climate crisis*, DARA/Climate Vulnerable Forum: Madrid, 2010.
- McMillan, M.; Shepherd, A.; Sundal, A.; Briggs, K.; Muir, A.; Ridout, A.; Hogg, A.; Wingham, D.; *Geophys. Res. Lett.* **2014**, *41*, 3899.
- Church, J. A.; White, N. J.; *Surveys Geophys.* **2011**, *32*, 585.
- Elsner, J. B.; Kossin, J. P.; Jagger, T. H.; *Nature* **2008**, *455*, 92.
- United Nations Climate Change; *Kyoto protocol*, disponível em <https://unfccc.int/process/the-kyoto-protocol>, acessada em junho 2018.
- Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas – COP-21 e CMP11; disponível em <https://nacoesunidas.org/cop21>, acessada em junho 2018.
- Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil*, 3ª ed, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento, Coordenação Geral do Clima, 2016.
- Bond, T. C.; *Testimony for the hearing on black carbon and climate change*, disponível em http://dust.ess.uci.edu/ppr/ppr_Bon07_wrt.pdf, acessada em junho 2018.
- Kandlikar, M.; Reynolds, C. C. O.; Grieshop, A. P.; *Copenhagen Consensus Center report*, 2010, disponível em <http://fixthecclimate.com/component-1/the-solutions-new-research/black-carbon>, acessada em junho 2018.
- Anenberg, S.; Balakrishnan, K.; Jetter, J.; Maser, O.; Mehta, S.; Moss, J.; Ramanathan, V.; *Environ. Sci. Technol.* **2013**, *47*, 3944.
- Aung, T. W.; Jain, G.; Sethuraman, K.; Baumgartner, J.; Reynolds, C.; Grieshop, A.; Marshall, J.; Brauer, M.; *Environ. Sci. Technol.* **2016**, *50*, 7228.
- World Liquefied Petroleum Gas Association; *Accelerating the LPG Transition: Global Lessons from Innovative Business and Distribution Models*, <http://www.wlpga.org/wp-content/uploads/2015/09/accelerating-the-lpg-transition-2015-light.pdf>, acessada em junho 2018.
- Budya, H.; Arofat, M.; *Energy Policy* **2011**, *39*, 7575.
- United States Agency for International Development; *Evaluating sustained adoption of LPG stoves in rural Ghana*, disponível em <http://www.tractionproject.org/research-areas/evaluating-sustained-adoption-lpg-stoves-rural-ghana>, acessada em junho 2018.
- Permadi, D. A.; Sofyan, A.; Oanh, N.; *Atmos. Environ.* **2017**, *154*, 82.
- Lansche, J.; Mueller, J.; *J. Cleaner Prod.* **2017**, *165*, 828.
- Empresa de Pesquisa Energética; *Balanço Energético Nacional*, ano base 2016, relatório 2017.
- Myhre, G.; Shindell, D.; Bréon, F. M.; Collins, W.; Fuglestedt, J.; Huang, J.; Koch, D.; Lamarque, J. F.; Lee, D.; Mendoza, B.; Nakajima, T.; Robock, A.; Stephens, G.; Takemura, T.; Zhang, T.; *Anthropogenic and Natural Radiative Forcing*, Cambridge University Press: Cambridge, 2013.
- IPCC *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Vol. 3 – Industrial Processes and Product Use*, disponível em <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol3.html>, acessada em junho 2018.
- GHG Protocol*, disponível em <http://www.ghgprotocolbrasil.com.br/inventarios?locale=pt-br>, acessada em junho 2018.
- Bond, T. C.; Doherty, S. J.; Fahey, D. W.; Forster, P. M.; Berntsen, T.; DeAngelo, B. J.; Flanner, M. G.; Ghan, S.; Kärcher, B.; Koch, D.; Kinne, S.; Kondo, Y.; Quinn, P. K.; Sarofim, M. C.; Schultz, M. G.; Schulz, M.; Venkataraman, C.; Zhang, H.; Zhang, S.; Bellouin, N.; Guttikunda, S. K.; Hopke, P. K.; Jacobson, M. Z.; Kaiser, J. W.; Klimont, Z.; Lohmann, U.; Schwarz, J. P.; Shindell, D.; Storelvmo, T.; Warren, S. G.; Zender, C. S.; *J. Geophys. Res. Atmos.* **2013**, *118*, 5380.
- Bond, T.; Zarzycki, C.; Flanner, M.; Koch, D.; *Atmos. Chem. Phys.*, **2011**, *11*, 1505.

34. Fuglestedt, J. S.; Shine, K. P.; Berntsen, T.; Cook, J.; Lee, D.S.; Stenke, A.; Skeie, R. B.; Velders, G. J. M.; Waitz, I. A.; *Atmos. Environ.* **2010**, *44*, 4648.
35. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística; *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios*, http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/pesquisas/pesquisa_resultados.php?id_pesquisa=40, acessada em junho 2018.
36. Grieshop, A. P.; Marshall, J. D.; Kandlikar, M. K.; *Energy Policy* **2011**, *39*, 7530.
37. Smith, K.; *Science* **2002**, *298*, 1847.
38. *Objetivos de desenvolvimento do Milênio*, Relatório Nacional de Acompanhamento, Ipea: Brasília, 2010.
39. Smith, K. R.; Uma R.; Kishore, R. R.; Lata, K.; Joshi, V.; Zhang, J.; Rasmussen, R. A.; Khalil, M. A.; <http://www.kirksmith.org/publications/2000/06/23/greenhouse-gases-from-small-scale-combustion-devices-in-developing-countries-phase-ii-household-stoves-in-india>, acessada em junho 2018.
40. Smith, K., Uma, R.; Kishore, V. V. N.; Zhang, J.; Joshiand, V.; Khalil, M. A. K.; *Ann. Rev. Energy Environ.* **2000**, *25*, 741.
41. Bailis, R.; Pennise, D.; Ezzati, M.; Kammen, D. M.; Kituyi, E.; *2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy and Industry*, Rome, Italy, 2004.
42. Edwards, R. D.; Smith, K. R.; Zhang, J.; Ma, Y.; *Energy Policy* **2004**, *32*, 395.
43. Singh, P.; Gundimeda, H.; Stucki, M.; *Int. J. Life Cycle Assess* **2014**, *19*, 1036.
44. Sanga, G. A.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2004.
45. Tollefson, J.; *Nature* **2013**, *493*, 12.
46. Pétron, G.; Miller, B. R.; Hirsch, A. I.; Montzka, S. A.; Karion, A.; Trainer, M.; Sweeney, C.; Andrews, A. E.; Miller, L.; Kofler, J.; Bar-Ilan, A.; Dlugokencky, E. J.; Patrick, L.; Moore Jr., C. T.; Ryerson, T. B.; Siso, C.; Kolodzey, W.; Lang, P. M.; Conway, T.; Novelli, P.; Masarie, K.; Hall, B.; Guenther, D.; Kitzis, D.; Miller, J.; Welsh, D.; Wolfe, D.; Neff, W.; Tans, P.; *J. Geophys. Res.* **2012**, *117*, D04304.
47. Johnson, D.; Covington, A.; Clark, N.; *Energy Technol.* **2014**, *2*, 1027.
48. Merrin, Z.; Gloss, S. L.; Francisco, P. W.; *Proceedings of The 14th International Conference of Indoor Air Quality and Climate*, Ghent, Belgium, 2016.
49. Naeher, L. P.; Leaderer, B. P.; Smith, K. R.; *Indoor Air* **2000**, *10*, 200.
50. Jiang, R.; Bell, M. L.; *Environ. Health Perspec.* **2008**, *116*, 907.
51. Pokhrel, A. K.; Bates, M. N.; Acharya, J.; Valentiner-Branth, P.; Chandyo, R. K.; Shrestha, P. S.; *Atmos. Environ.* **2015**, *113*, 159.
52. Inatomi, T. A. H.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2000.
53. Leite, M. A.; *II Semana do Meio Ambiente da Universidade Estadual Paulista*, Ilha Solteira, 2005.
54. Obeng, G. Y.; Mensah, E.; Ashiagbor, G.; *Energies* **2017**, *10*, 641.
55. Rahman, K. M.; Melville, L.; Fulford, D.; *Waste Manage. Res.* **2017**, *35*, 1023.
56. Santiago, F.; Jalfim, F.; Freitas, R.; Gomes-Silva, N.; Blackburn, R.; Azevedo, M. A.; Nanes, M. E. Dias, I.; *X Congresso Nacional de Meio Ambiente*, Poços de Caldas, Brasil, 2013.
57. Ekouevi, K.; Freeman, K. K.; Soni, R.; *Understanding the Differences Between Cookstoves, LiveWire, A Knowledge Note Series for the Energy and Extractive Global Practice*, World Bank Group, Washington D. C., 2014.
58. <http://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas>, acessada em junho 2018.
59. <http://www.anp.gov.br/?pg=80362&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&1461165378852>, acessada em junho 2018.
60. <https://www.gasnaturalfenosa.com.br/br/rio+de+janeiro/grandes+clientes/distribuicao+de+gas+natural/tarifas/1297092073998/ceg+.html>, acessada em junho 2018.
61. Ezzati, M.; Mbinda, B. M.; Kammen, D. M.; *Environ. Sci. Technol.* **2000**, *34*, 578.
62. Smith, K. R.; *Annual Rev. Energy Environ.* **1993**, *18*, 529.
63. Joon, V.; Kumari, H.; Chandra, A.; Bhattacharya, M.; *International Conference on Chemistry and Chemical Process*, vol. 10, IACSIT Press, Singapore, 2011.
64. Ni, K.; Carter, E. M.; Schauer, J. J.; Ezzati, M.; Zhang, Y.; Niu, H.; Lai, A. M.; Shan, M.; Wang, Y.; Yang, X.; Baumgartner, J.; *Proceedings of The 14th International Conference of Indoor Air Quality and Climate*, Ghent, Belgium, 2016.
65. Bond, T. C.; Lam, N. L.; Thompson, R.; Upadhyay, B.; *Proceedings of The 14th International Conference of Indoor Air Quality and Climate*, Ghent, Belgium, 2016.
66. Houck, J. E.; Tiegs, P.; McCrillis, R.; Keithley, C.; Crouch, J.; *The Proceedings of a U. S. EPA and Air Waste Management Association Conference*, Washington, D. C., 1998.
67. Hamada, G. S.; Kowalski, L. P.; Murata, Y.; Matsushita, H.; Matsuki, H.; *Tokai J. Experim. Clin. Med.* **1992**, *17*, 145.
68. Silva, L. F. F.; Saldiva, S. R. M.; Saldiva, P. H. N.; Dolnikoff, M.; *Environ. Res.* **2012**, *112*, 111.
69. Santiago, N. A.; de Carvalho, R. L. T.; da Silva, A. C.; de Sousa, K. P.; *Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia*, Fortaleza, Brasil, 2015.
70. Carvalho, L. T.; Jensen, O. M.; Tarelho, L. A. C.; Cabral da Silva, A.; *Proceedings Indoor Air*, Hong Kong, 2014.
71. Pandit, G. G.; Srivastava, P. K.; Rao, A. M. M.; *Sci. Total Environ.* **2001**, *279*, 159.
72. Tiwari, M.; Sahu, S. K.; Bhangare, R. C.; Ajmal, Y.; Pandit, G. G.; *Microchem. J.* **2013**, *106*, 79.
73. Lodhi, M. A. K.; Zain-al-Abdin, A.; *Energy Conv. Manage.* **1999**, *40*, 243.
74. Begum, B. A.; Paul, S. K.; Hossain, M. D.; Biswas, S.; Hopke, P. K.; *Build. Environ.* **2009**, *44*, 898.
75. Albalak, R.; Keeler, G. J.; Frisnacho, A. R.; Haber, M.; *Environ. Sci. Technol.* **1999**, *33*, 2505.
76. Saeed, A.; Abbas, M.; Manzoor, F.; Ali, Z.; *J. Animal Plant Sci.* **2015**, *25*, 687.
77. Mullen, N. A.; Li, J.; Singer, B. C.; *Impact of Natural Gas Appliances on Pollutant Levels in California Homes*, LBNL- 5970e, Lawrence Berkeley National Laboratory: Berkeley, 2012.
78. Zhang, J.; Smith, K. R.; Uma, R.; Ma, Y.; Kishore, V. V. N.; Lata, K.; Khalil, M. A. K.; Rasmussenand, R. A.; Thorneloe, S. T.; *Chemosphere* **1999**, *1*, 367.