



UFSC



Artigos

Avaliação de emissões atmosféricas e cinzas geradas na cocombustão de carvão mineral com resíduos florestais

Evaluation of atmospheric emissions and ash generated from co-firing of mineral coal with forest residues

Felipe de Aguiar de Linhares¹ , Keila Guerra Pacheco Nunes¹ ,
Pedro Juarez Melo¹ , Nilson Romeu Marcílio¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

RESUMO

A geração de energia a partir de combustíveis não renováveis vem motivando pesquisas que buscam alternativas para a redução de impactos ambientais que envolvem gases poluentes, como CO₂, CO, SO₂ e NO_x. Nesse contexto, o uso de resíduos orgânicos (biomassas) na cocombustão com carvão mineral, aliado à tecnologia de leito fluidizado, vem sendo mencionado como um dos principais meios de geração de energia sustentável utilizando combustíveis sólidos. Dessa forma, o objetivo do trabalho foi estudar a cocombustão do carvão mineral e materiais orgânicos residuais em uma planta piloto de 0,25 MW_t, constituída por um reator de leito fluidizado borbulhante (RLFB) para avaliar as emissões dos gases de combustão. Objetivou-se, também, caracterizar os materiais utilizados e as cinzas geradas no processo de cocombustão, visando avaliar possíveis usos das mesmas. No presente trabalho, foram utilizados dois tipos de biomassas residuais da região sul do Brasil: resíduo de casca da acácia-negra (RCA) e cavaco de eucalipto (RCE). O carvão mineral, utilizado neste estudo, contém altos teores de enxofre e foi proveniente da mina de Candiota (CC), localizada no estado do Rio Grande do Sul. Utilizando a mistura de 75% RCA e 25% CC na alimentação do reator, obtiveram-se emissões gasosas com concentrações de SO₂ abaixo do limite estabelecido pela legislação ambiental do Rio Grande do Sul (400 mg/Nm³), significando 90% de redução em comparação às emissões geradas com a combustão de CC puro. Para todos os testes de cocombustão de biomassas com carvão mineral, as concentrações de NO_x e CO obtidas foram abaixo do limite de emissão permitido pela legislação ambiental. As cinzas geradas nos processos de cocombustão apresentaram altos valores de temperatura de fusão (superiores a 1280°C) reduzindo o risco de ocorrência de problemas de incrustação e entupimento dos equipamentos.

Palavras-chave: Cocombustão; Biomassa; Leito fluidizado; Emissões atmosféricas; Caracterização das cinzas



Artigo publicado por Ciência Florestal sob uma licença CC BY 4.0.

ABSTRACT

The generation of energy from non-renewable fuels has motivated research that seeks alternatives to reduce environmental impacts involving polluting gases such as CO₂, CO, SO₂ and NO_x. In this context, the use of organic waste (biomass) in co-firing with coal, combined with fluidized bed technology, has been mentioned as one of the main means of generating sustainable energy using solid fuels. The objective was to study the co-combustion of coal and residual organic materials in a pilot plant of 0.25 MW_t, constituted with a bubbling fluidized bed reactor to evaluate the emissions. In this work, two types of residual biomass from southern Brazil were used, black wattle bark residue and eucalyptus wood chips. The coal used in this study contains high levels of sulfur and came from the Candiota mine (CC). Using a mixture of 75% RCA and 25% CC in the reactor feed, gaseous emissions were obtained with SO₂ concentrations below the limit established by the environmental legislation (400 mg/Nm³), meaning a 90% reduction in comparison with the emissions generated from the combustion of pure CC. Tests of co-combustion of biomass with coal showed concentrations of NOx and CO below the emission limit allowed by environmental legislation. The ashes generated during co-combustion processes had high melting temperature values (above 1280 °C), reducing the risk of problems with encrustation and equipment clogging.

Keywords: Co-firing; Biomass; Fluidized bed; Atmospheric emissions; Ash characterization

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia a partir do uso de combustíveis fósseis e a preocupação com o impacto ao meio ambiente vêm favorecendo o desenvolvimento de pesquisas que buscam mitigar emissões atmosféricas e viabilizar o uso sustentável das fontes não renováveis de energia. Entre os recursos energéticos não renováveis, o carvão mineral ocupa a primeira colocação em abundância e perspectiva de vida útil, sendo, a longo prazo, uma das mais importantes reservas energéticas mundial. O carvão fornece um terço de toda a energia usada no mundo e representa 38,5% da geração de eletricidade, além de desempenhar um papel crucial em setores como a indústria do ferro e aço (International Energy Agency, 2021).

A tecnologia de leito fluidizado traz vantagens substanciais na conversão de energia em comparação com métodos tradicionais, como leito fixo. Essa abordagem oferece flexibilidade no uso de combustíveis, permitindo a queima eficiente de materiais sólidos de baixa qualidade, como carvão com alto teor de cinzas e biomassas com alto teor de umidade. Esses benefícios decorrem da uniformidade na temperatura

de operação, conforme destacado por Flegkas *et al.* (2018) e Wander *et al.* (2020). O princípio subjacente envolve o fluxo de um fluido por um leito de partículas, onde estas se tornam suspensas quando o fluido atinge uma velocidade suficiente para superar a queda de pressão do meio, fenômeno conhecido na engenharia como estado de fluidização.

Pesquisadores vêm estudando a utilização de diferentes tipos de biomassas na cocombustão com carvão mineral em sistemas de leito fluidizado. Os principais parâmetros analisados nos trabalhos são: características de combustão (Goldfarb; Ceylan, 2015) e das cinzas formadas (Henne *et al.*, 2020), fluidodinâmica, segregação do leito (Kuprianov; Janvijitsakul; Permchart, 2006), emissões atmosféricas (Nunes; Matias; Catalão, 2014; Kumar; Mohapatra; Singh, 2015) e disponibilidade de matéria prima (Dumortier, 2013). Em comum, as pesquisas qualificam a tecnologia de leito fluidizado como um dos principais meios de geração de energia sustentável para combustão de combustíveis sólidos, principalmente, devido às características, como flexibilidade, estabilidade e eficiência dos equipamentos (Khan *et al.*, 2009).

Com relação às fontes de energia ecológica, a biomassa é constituída, principalmente, de materiais orgânicos com composição polimérica, como a celulose, a hemicelulose e a lignina, as quais variam em quantidades relativas para cada tipo de composto. Um dos benefícios da sua utilização em processos de combustão é a possibilidade da neutralização das emissões dos gases causadores do efeito estufa como o CO₂. Esse fato é atribuído a um balanço nulo nas emissões de CO₂ quando se queima a biomassa, pois há uma relação direta do dióxido de carbono liberado para a atmosfera na sua combustão e a quantidade que foi absorvida da atmosfera através de fotossíntese pela vegetação (biomassa). Outro benefício no uso da biomassa é a possibilidade do aproveitamento de resíduos provenientes da agricultura, silvicultura, assim como resíduos industriais ou urbanos que apresentam fração biodegradável possíveis de serem utilizados como combustíveis (Eom; Kim; Lee, 2011; Jiang *et al.*, 2013). Dessa forma, o uso de biomassa na queima com carvão mineral contendo alto

teor de enxofre pode minimizar emissões de poluentes, como o dióxido de enxofre (SO_2), em vista do baixo teor do composto na biomassa ao contrário do alto teor encontrado no carvão das reservas brasileiras.

Nos últimos anos, as biomassas têm ganhado destaque como fonte de energia, com o Brasil gerando grandes volumes anuais de resíduos orgânicos com potencial energético, como bagaço de cana-de-açúcar, cascas de arroz, cascas de acácia-negra e cavacos de eucalipto. O estado do Rio Grande do Sul se destaca pela produção anual de 250.000 toneladas de resíduos de cascas de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.), derivados da indústria de extração do tanino. Além disso, o Rio Grande do Sul lidera o cultivo dessa leguminosa no País, com florestas da espécie ocupando 75 mil hectares, que apresentam interesse global crescente na sua polpa celulósica visando a produção de celulose via processo kraft, sob diversas condições de cozimento (Giesbrecht *et al.*, 2022). Sabe-se que essa biomassa é do tipo lignocelulósica e estruturada principalmente por três polímeros: celulose, hemicelulose e lignina. Além disso, há outros compostos em pequenas quantidades, como grupos acetil e minerais, contribuindo para uma arquitetura complexa.

Na região sul do Brasil, as condições naturais e geográficas favorecem o cultivo do eucalipto (*Eucalyptus spp.*), também um tipo biomassa lignocelulósica e que tem importância no cenário brasileiro, tanto no cultivo como no aproveitamento energético. Adaptada ao clima e solo locais, o eucalipto apresenta poder calorífico, entre 16,46 MJ/kg e 19,17 MJ/kg (Neiva; Furtado; Finzer, 2018), enquanto, o carvão da mina de Candiota, com alto teor de cinzas, apresenta valores compreendidos entre 10,26 MJ/kg e 14,46 MJ/kg (Kalkreuth *et al.*, 2013; Faé Gomoes, 2014). Apesar de ocupar apenas cerca de 1% do território nacional, o cultivo de eucalipto contribui com mais de 90% da produção total de madeira para fins industriais (Maggi *et al.*, 2018). Assim, os resíduos da madeira de eucalipto oferecem oportunidade de aproveitamento energético, destacando a briquetagem e o cavaco como eficientes na concentração de energia na biomassa florestal (Souza *et al.*, 2022).

Diante do exposto, verifica-se a importância da realização de estudos que viabilizem o uso do carvão mineral com alto teor de enxofre e de resíduos florestais em sistemas de planta piloto como alternativas para a geração de energia. Dessa forma, o objetivo do trabalho foi estudar a cocombustão do carvão mineral e materiais orgânicos residuais, casca de acácia-negra e cavaco de eucalipto em uma planta piloto de 0,25 MW_t, constituída com reator de leito fluidizado borbulhante (RLFB) para avaliar as emissões dos gases de combustão. Aquém, objetivou-se caracterizar os materiais utilizados neste estudo e as cinzas geradas no processo de cocombustão, visando avaliar possíveis usos das mesmas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho, foram utilizados dois tipos de biomassa abundantes na região sul do Brasil, sendo: resíduo da casca de acácia-negra (RCA), proveniente da indústria de extração de tanino, e cavaco de eucalipto (RCE), proveniente da indústria de celulose e papel. O carvão mineral utilizado foi procedente da mina de Candiota (CC), maior jazida de carvão do Brasil, localizada na região sul do estado do Rio Grande do Sul. A parte experimental foi executada no Departamento de Engenharia de Processos da extinta Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do RS – CIENTEC, no campus avançado localizado no município de Cachoeirinha no estado do Rio Grande do Sul.

2.1 Caracterização das matérias-primas

Os combustíveis CC, RCA e RCE foram caracterizados através de análise imediata, análise elementar e poder calorífico inferior (PCI). As amostras de cada combustível foram retiradas de um lote estocado de cerca de 100 kg, do qual foram coletadas 10 porções em pontos diferentes, escolhidos ao acaso. As frações retiradas de cada lote foram reunidas, homogeneizadas e quarteadas. Uma única alíquota de amostra foi gerada para análise e caracterização. Todos os ensaios de caracterização dos combustíveis foram realizados de acordo com as normas ASTM D7582-15, D5373-08,

D4239-11 e ABNT-NBR 8633-84 e os ensaios de fusibilidade das cinzas foram realizados de acordo com a norma ASTM D1857/D1857M-18. Os testes em planta piloto foram realizados apenas uma vez para cada condição de operação, tendo em vista o tempo necessário para atingir a temperatura de operação do reator, em torno de 850 °C. Ressalte-se, ainda, os problemas decorrentes do travamento da rosca de alimentação do reator devido às características fibrosas das biomassas, o que dificultou a realização de testes em duplicata.

Para avaliar a degradação térmica das matérias-primas, foram realizados testes termogravimétricos (TGA) da temperatura ambiente até 900 °C em atmosfera de ar sintético utilizando uma termobalança (Perkin Elmer, modelo TGA7). Uma massa de 15 mg de cada amostra foi pesada e inserida em um cadrinho suporte. O fluxo de ar sintético foi mantido a 20 mL/min. A taxa de aquecimento foi de 5°C/min desde a temperatura ambiente até a temperatura de 200°C. Após estabilização da massa em 200°C a taxa de aquecimento foi alterada para 10°C/min até atingir a temperatura de 900°C.

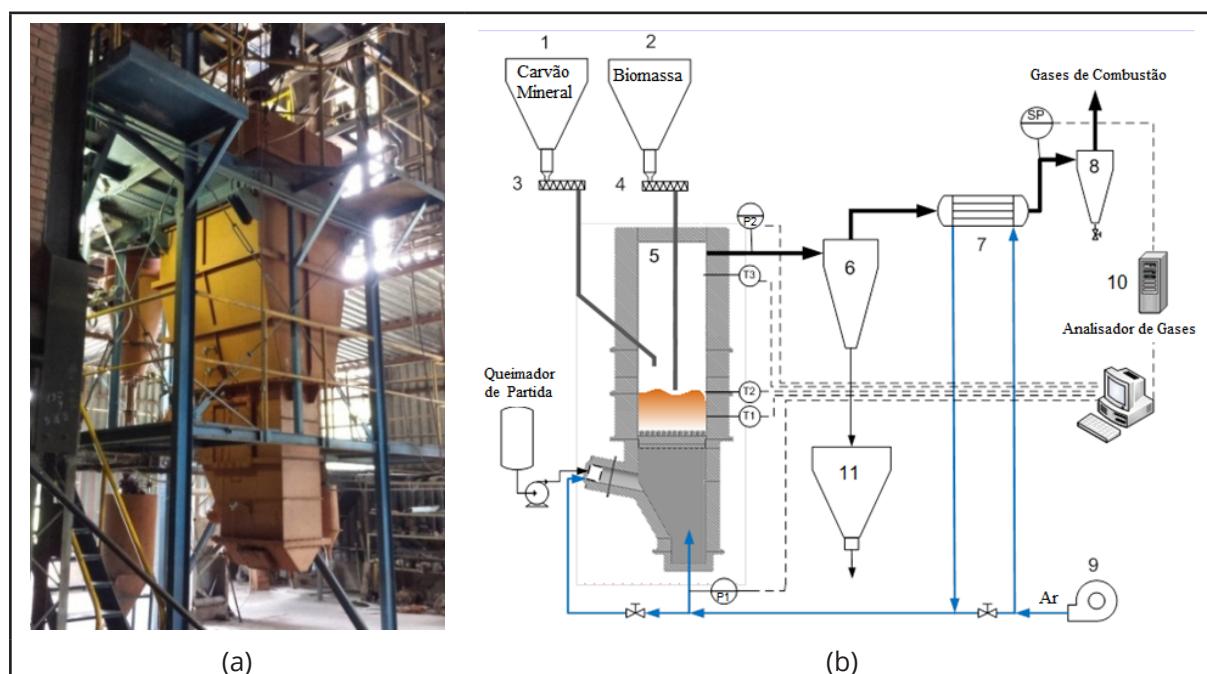
Cinzas volantes (silo de cinzas) e cinzas do leito fluidizado, geradas no processo experimental na planta piloto, foram coletadas e analisadas por fluorescência de raios X (FRX) e difração de raios X (DRX). Devido à presença de cinzas de biomassa que podem conter óxidos fundentes, as características de fusibilidade das cinzas volantes e das cinzas do leito fluidizado foram avaliadas usando um microscópio analisador de temperatura de fusão. Diante disso, foram obtidas as temperaturas de deformação (DT), de esfera (ST), de semi-esfera (HT) e de fusão (FT), com taxa de aquecimento de 10 K/min até 1500°C.

2.2 Testes em planta piloto com reator de leito fluidizado

Os testes de cocombustão foram realizados em planta piloto de 0,25 MW_t equipada com sistema de reator de leito fluidizado borbulhante (RLFB). A Figura 1a mostra o reator da planta piloto, com altura externa de 2,8 m, que possui uma câmara

de combustão de aço carbono revestida, internamente, com material refratário. O interior do leito apresenta dimensões de 40 cm de altura, 27 cm de largura e 97 cm de comprimento, sendo composto de areia com diâmetro médio de partícula de 0,45 mm. A Figura 1b apresenta o fluxograma do processo com os principais equipamentos e acessórios.

Figura 1 – Planta piloto utilizada na realização dos testes experimentais: (a) foto do RLFB (b) e fluxograma do processo de cocombustão com os principais equipamentos do sistema



Fonte: Autores (2018, 2023)

Durante as operações realizadas, carvão mineral CC armazenado no silo (1) e um tipo de biomassa por vez (RCA ou RCE) armazenada no silo (2) são conduzidas, com taxas controladas através de transportador tipo roscas sem fim (3 e 4), para a fornalha do RLFB (5), onde ocorre a cocombustão. Os gases gerados sobem ao longo do reator e passam através do ciclone (6) para a separação das cinzas. As cinzas separadas dos gases são depositadas no silo de cinzas (11). Na sequência, os gases seguem pelo trocador de calor (7), que aproveita o calor dos gases gerados para pré-aquecer o ar

de entrada no leito fluidizado. Por fim, os gases da combustão passam através de um novo ciclone (8) e então são liberados na chaminé. O ventilador de tiragem forçada (9) fornece o ar que alimenta o sistema. Os pontos de medida de pressão do reator estão representados, na Figura 1, pelos pontos P1 e P2. O ponto de amostragem (SP) dos gases da combustão está localizado após o trocador de calor (7) e é interligado a um analisador de gases (10) (HORIBA CMA-680). Os pontos T1 e T2 representam os termopares que registram a temperatura no interior do leito e na zona de fluidização. A supervisão, controle e aquisição de dados foram realizados através de sistema supervisório.

Para reproduzir as condições convencionais de operação, foram realizadas operações, na planta piloto, com a queima unicamente do carvão CC. Os testes de cocombustão foram realizados através de variações das proporções mássicas de alimentação entre as biomassas (RCA e RCE) e o carvão (CC). Dessa forma, a alimentação contínua do leito foi realizada com as composições apresentando 40% e 60%, em massa, de resíduo de eucalipto em relação ao carvão (amostras denominadas RCE40 e RCE60, respectivamente). Ainda, uma condição de queima com 100% de resíduo de eucalipto na alimentação foi realizada (amostra RCE).

Os testes com carvão (CC) e resíduo de casca de acácia-negra (RCA) foram realizados nas proporções de 40%, 60% e 75%, em massa, da RCA em relação ao carvão (amostras denominadas RCA40, RCA60 e RCA75, respectivamente). A operação para a comparação utilizando 100% de RCA no reator não pode ser realizada devido a problemas de entupimento e travamento da rosca de alimentação, ocasionada pela constituição fibrosa do material. A determinação da temperatura de operação do sistema e a coleta de dados foram realizadas após a estabilização da temperatura no leito (T1 e T2) em cerca de 850 °C. Vale destacar, a temperatura ideal em leitos de RLFB para garantir a combustão completa de combustíveis sólidos fica entorno dos 850°C (Gomes; Vilela; Zen Osório, 2013). Essa temperatura ainda favorece a calcinação completa e favorece as condições termodinâmicas da reação de sulfatação, e com isso, uma concentração muito baixa de SO₂ em desprendida no gás de exaustão (Valk,

1995). A duração de cada condição de alimentação, no RLFB, manteve-se entre 60 e 80 min após a estabilização das condições de operação.

A coleta dos dados foi realizada após a estabilização das condições de operação do leito da seguinte forma: foram fixadas as vazões mássicas dos combustíveis (carvão mineral e biomassa), sendo que a vazão de ar de alimentação do reator foi ajustada entre 191,6 Kg/h a 243,0 Kg/h a fim de manter a temperatura no interior do leito fluidizado, próxima de 850°C.

As vazões de cavaco de eucalipto (RCE) foram de 40 %, 60 % e 100 % em massa em relação ao carvão mineral (CC) e os testes com resíduo de casca de acácia-negra (RCA) foram realizados em proporções de 40 %, 60 % e 75 % em massa da RCA em relação ao CC. A operação com alimentação de 100 % de RCA no reator não pode ser realizada devido a problemas de entupimento e travamento da rosca de alimentação do reator ocasionada pela constituição fibrosa do material. Um teste com a utilização de 100 % de carvão mineral CC foi realizado como parâmetro de referência, para fins de comparação dos resultados de cocombustão.

As eficiências de combustão (η_c) nas diferentes condições de operação foram calculadas de acordo com Despina Vamvuka *et al.* (2012), conforme a Equação (1):

$$\eta(\%) = 100 - \frac{CO_2}{CO_2 - CO} - L_{cv} - L_{cf} \quad (1)$$

Onde: L_{cv} é o carbono não queimado nas cinzas volantes determinado experimentalmente por análise TGA através das cinzas volantes coletadas no silo de cinzas (11) após o ciclone de separação (6) da Figura 1b; O termo L_{cf} representa o carbono não queimado das cinzas pesadas que se acomodam no interior do leito.

Após cada teste, amostras de cinzas pesadas foram coletadas e analisadas quanto ao teor de carbono. Como esperado para este tipo de combustor, os teores de carbono para cinzas de fundo foram baixos para todas as amostras (menos de 0,5 % em peso). Os termos CO e CO₂ representam os teores desses compostos que estão presentes nas emissões geradas, obtidos através do analisador de gases.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com relação ao tamanho das partículas, o carvão Candiota (CC) apresentou diâmetro médio de 0,35 mm. As biomassas avaliadas, resíduos de cavaco de eucalipto (RCE) e resíduos de casca de acácia-negra (RCA), foram adquiridas em formas irregulares, mas com tamanhos entre 1 e 5 mm de espessura e 5 a 10 mm de largura, respectivamente.

A Tabela 1 apresenta os resultados da análise imediata, análise elementar e poder calorífico inferior (PCI) dos combustíveis utilizados na pesquisa.

Tabela 1 – Análise imediata, análise elementar e poder calorífico inferior (PCI) dos resíduos florestais RCA, RCE e do carvão CC

Análises	RCA	RCE	CC
Imediata (%)			
Carbono Fixo ^a	20,0	12,2	21,9
Matéria Volátil ^a	76,2	82,5	23,1
Cinzas ^a	3,8	5,3	55,0
Umidade	12,0	14,6	17,1
Elementar ^a (%)			
C	51,3	47,8	33,8
H	4,1	5,4	2,3
S	0,1	0,1	1,9
N	1,4	0,1	0,6
O	39,4	41,4	61,4
Poder Calorífico Inferior (kJ/kg)			
PCI ^a	18430	17115	12205

Fonte: Autores (2023)

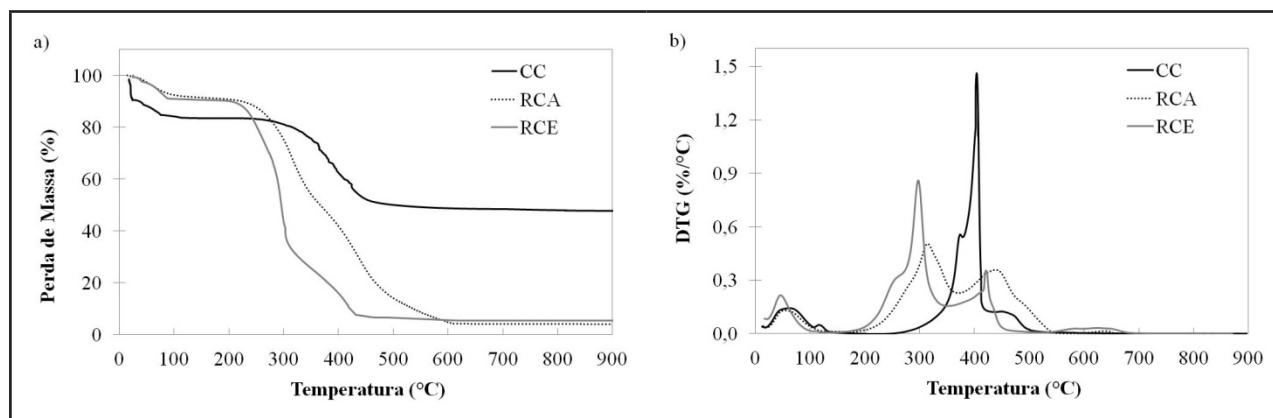
Em que: ^a base seca

Conforme apresentado na Tabela 1, o carvão mineral tem um alto teor de cinzas de 55 % em massa e um teor uma quantidade significativa de enxofre de 1,9 %. Comparando com o carvão mineral, as biomassas têm um teor de matéria volátil mais elevado. Além disso, o teor de carbono nas biomassas é maior que no carvão, justificando explicando por que as biomassas têm um poder calorífico superior

ao do carvão mineral. Os resultados da caracterização dos combustíveis estão em concordância com os estudos anteriores de Faé Gomes (2013), que utilizou casca de acácia-negra e carvão mineral de Candiota em um estudo sobre produção mais limpa com o uso de carvão mineral e biomassa, e com o estudo de Nunes (2016), que também usou carvão de Candiota para avaliar a cinética da combustão de carvões com alto teor de cinzas.

A partir das análises termogravimétricas (TGA) e termogravimétricas derivadas (DTG), foi possível observar a evolução da perda de massa das amostras dos combustíveis RCA, RCE e CC em função do aumento da temperatura, conforme apresenta a Figura 2. O processo de combustão de biomassas lignocelulósicas pode ser dividido em quatro zonas principais: remoção de umidade e componentes voláteis muito leves ($<120^{\circ}\text{C}$); degradação da hemicelulose ($220 - 315^{\circ}\text{C}$); decomposição de celulose e lignina ($\sim 315 - 400^{\circ}\text{C}$) e degradação de lignina ($> 400^{\circ}\text{C}$) (Sanchez-Silva, 2012; Asadieraghi; Wan Daud, 2014). Essa última zona diz respeito à estabilização da massa associada ao carbono sólido não convertido (Crelling, 1992; Silva; Milioli, 2008; Ávila, 2017).

Figura 2 – Curvas termogravimétricas de perda de massa (a) TGA e (b) DTG do Carvão Candiota (CC), resíduo de casca de acácia-negra (RCA) e resíduo de cavaco de eucalipto (RCE)



Fonte: Autores (2023)

Na Figura 2a, os dados indicam perdas de massa de aproximadamente 10 % para as biomassas RCA e RCE até 100 °C, associadas à umidade. Entre 250°C e 600°C, ocorre outra perda de massa, relacionada à decomposição de celulose, hemicelulose e lignina. Após atingir 450°C e 600°C, a perda de massa se estabiliza para RCE e RCA, respectivamente, sendo isso atribuído ao teor de cinzas dos materiais (Pécora *et al.*, 2014). A análise de CC, na Figura 2a, revela uma perda de massa menos acentuada em comparação com as biomassas RCE e RCA, no entanto, três eventos de perda de massa podem ser observados para o carvão mineral CC: perda de umidade até 110°C (cerca de 20 % de perda de massa), oxidação de hidrocarbonetos e matéria volátil entre 300°C e 450°C (45 % de perda de massa), e estabilização da massa relacionada às cinzas do carvão após esse ponto (Ávila *et al.*, 2017).

Na Figura 2b, as maiores taxas de degradação das biomassas RCE e RCA correspondem à degradação de hemicelulose a uma temperatura próxima de 300°C. Pode-se observar que o pico da degradação da celulose de RCA e RCE não ficou aparente no gráfico da derivada da perda de massa, Figura 2b. Esse resultado pode estar relacionado à degradação da celulose que ocorre simultaneamente à degradação da lignina, podendo causar picos sobrepostos nesta faixa de degradação (Huang *et al.*, 2011). Ainda, a decomposição da lignina do RCA ocorreu mais lentamente, como representado pelo “ombro” mais largo de desvolatização, Figura 2b, entre as temperaturas de 450°C e 550°C. Isso se deve ao fato de a lignina ser um componente reforçador da parede celular, possuindo uma estrutura termicamente complexa mais estável do que a hemicelulose e a celulose; portanto, sua degradação completa ocorre em temperaturas mais elevadas (Vamvuka *et al.*, 2003; Van *et al.*, 2010; Teixeira, 2015). A determinação de valores de temperatura acima de 430°C para RCE e 550°C para RCA demonstra a estabilização da massa que está associada ao teor de cinzas (material inorgânico) dos materiais (Edreis, 2013; Pécora *et al.*, 2014). Os dados das análises TGA e DTG para as biomassas corroboram os determinados pela análise imediata apresentados na Tabela 1.

3.1 Ensaios de cocombustão e emissões geradas

A Tabela 2 apresenta a matriz experimental com os dados operacionais dos testes realizados no reator de leito fluidizado borbulhante (RLFB). Observa-se que as taxas de alimentação dos combustíveis expressas em Kg/h correspondem a razão “Massa de Biomassa por Massa de Carvão Mineral, em percentual, representada pelo termo “% m/m”. Ainda, são apresentadas as temperaturas médias no interior do leito obtidas durante cada teste no RLFB.

Tabela 2 – Matriz experimental utilizada neste estudo

Combustíveis	Nome do Teste	Biomassa/Carvão na alimentação (% m/m)	Taxa de alimentação de carvão (kg/h)	Taxa de alimentação de biomassa (kg/h)	Fluxo de Ar (kg/h)	Temperatura do leito (°C)	
						T1	T2
CC	CC	0/100	33,10	-	223,9	847	855
CC e RCA	RCA40	40/60	15,90	10,1	191,6	847	853
CC e RCA	RCA60	60/40	10,70	16,2	199,0	850	856
CC e RCA	RCA75	75/25	6,00	23,4	195,6	853	859
CC e RCE	RCE40	40/60	16,47	10,8	221,3	851	859
CC e RCE	RCE60	60/40	11,00	17,5	216,9	847	855
RCE	RCE	100/0	-	28,2	243,0	854	858

Fonte: Autores (2023)

Na Tabela 3, são apresentadas as concentrações médias dos gases SO₂, NOx e CO, em base seca, gerados no processo de cocombustão e na combustão com CC. Observa-se uma redução significativa na concentração de SO₂ com o aumento da fração de ambas as biomassas na corrente de alimentação do reator. Nas operações com 40% e 60% de resíduo de eucalipto (testes RCE40 e RCE60), as concentrações de SO₂ excederam o limite de emissão (400 mg/Nm³) estabelecido pelo órgão ambiental do Rio Grande do Sul. No entanto, nos testes com 60% e 75% de resíduo de casca de acácia (testes RCA60 e RCA75), as concentrações de SO₂ ficaram abaixo do limite admitido. Além disso, em comparação com as emissões da queima de combustível CC puro, houve uma redução significativa de 93 % nas emissões desse composto. Esses

resultados indicam que a adição de casca de acácia nas concentrações mencionadas proporciona uma significativa redução nas emissões de SO₂ geradas mantendo-se a estabilidade operacional. Contudo, mais testes utilizando as biomassas RCA e RCE são necessários para estudar a diferença apresentada de sinergia entre estas e na cocombustão com carvão CC.

Ainda, os resultados da Tabela 3 para o SO₂ podem ser explicados, porque as biomassas (RCA e RCE) têm baixos teores de enxofre, 0,1 % em comparação com o teor de 1,9 % do carvão mineral (CC), apresentados na Tabela 1. Isso leva a uma menor concentração desse composto nos gases produzidos. Outros estudos, como o de Atimtay e Kaynak (2008) usando restos de caroço de pêssego e o de Varol *et al.* (2018) usando pallets de madeira, mostraram resultados semelhantes nas concentrações de SO₂ em emissões geradas durante o processo de cocombustão com carvão mineral.

Tabela 3 – Concentração de SO₂, NO_x e CO nos gases de combustão de CC e nos testes com RCE e RCA na alimentação e eficiência de combustão η_c

Combustíveis	Nome do teste	Biomassa/Carvão na alimentação		SO ₂ (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	CO (mg/Nm ³)	Eficiência de combustão η _c (%)
		(% m/m)					
CC	CC	0/100		3520	249	139	93,0
CC e RCA	RCA40	40/60		506	320	159	92,8
CC e RCA	RCA60	60/40		297	333	164	93,0
CC e RCA	RCA75	75/25		246	349	151	93,0
CC e RCE	RCE40	40/60		2595	329	101	95,4
CC e RCE	RCE60	60/40		1153	318	71	95,7
RCE	RCE	100/0		292	211	58	95,8

Fonte: Autores (2023)

Em que: Limites de emissão estabelecidos pela legislação ambiental: SO₂ = 400 mg/Nm³, NO_x = 400 mg/Nm³ e CO= 250 mg/Nm³ (FEPAM, 2018).

Os testes com diferentes proporções de RCE e RCA no reator não mostraram mudanças significativas nas emissões de NOx (Tabela 3). Isso ocorreu porque os experimentos foram realizados em temperaturas de leito relativamente baixas, por volta de 847 a 859°C, não favorecendo a formação de NOx térmico, mas sim a utilização

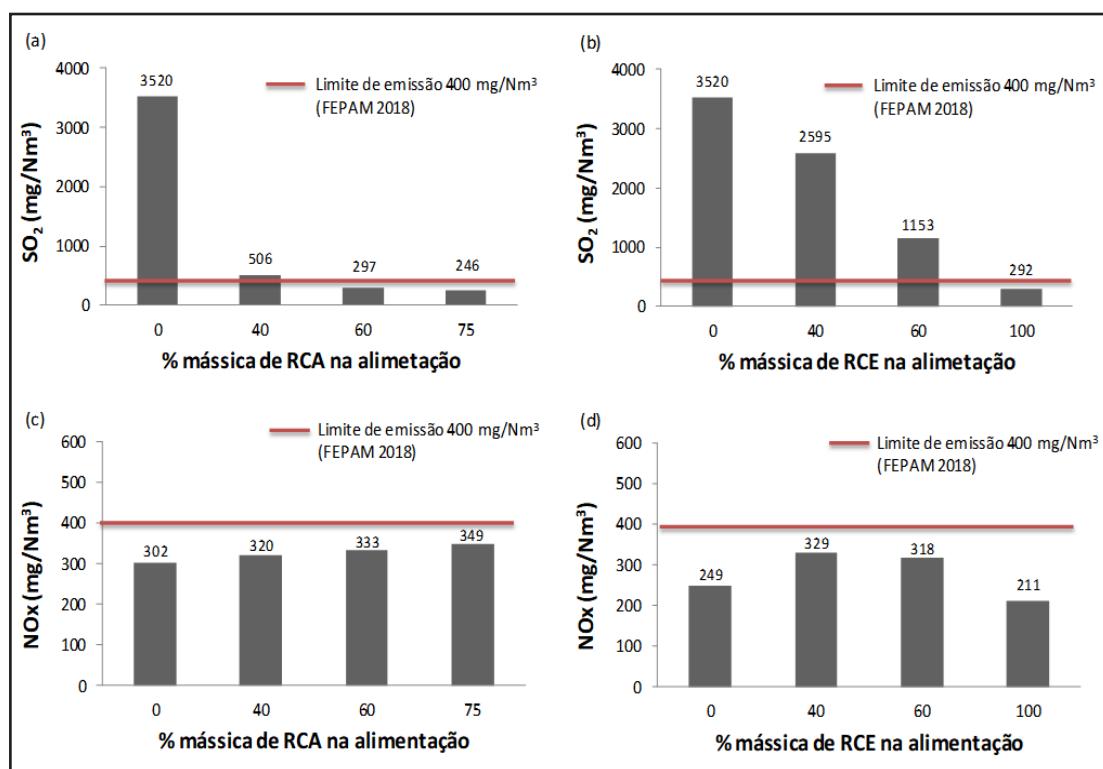
do nitrogênio do próprio combustível (Van Loo; Koppejaan, 2008; Liu *et al.*, 2013). Dessa forma, as emissões de NOx derivadas da cocombustão de RCA, nas maiores concentrações dos combustíveis, foram superiores quando comparadas às de RCE, em virtude do maior teor de nitrogênio presente nas primeiras, como evidenciado na Tabela 1. Contudo, todas as concentrações resultantes de NOx mantiveram-se abaixo do limite de emissão estabelecido pelo órgão regulamentador, 400 mg/Nm³ (FEPAM, 2018). É importante ressaltar que a formação de NOx é influenciada pela temperatura de combustão, sendo favorecida acima de 1400°C. Por esse motivo, o uso do reator de leito fluidizado é uma vantagem, visto que nestes reatores a temperatura de combustão no leito não ultrapassa 900°C, resultando em baixas emissões de NOx (Madanayake *et al.*, 2017).

Os valores de concentração de CO nas emissões, em função da taxa de alimentação das biomassas no reator, situaram-se entre 164 e 58 mg/Nm³ para os testes de cocombustão de RCA60 e RCE (Tabela 3). Essas concentrações podem ser consideradas reduzidas ao analisar as propriedades das biomassas e compará-las, por exemplo, aos valores obtidos por Sun *et al.* (2013). Esses autores empregaram como combustíveis carvão sub-betuminoso e serragem, com características semelhantes às utilizadas neste estudo em um reator de leito fluidizado circulante. Os resultados alcançados pelos referidos autores situaram-se em torno de 220 a 290 ppm (250 a 320 mg/m³) com uma taxa de alimentação de até 25 % de biomassa no reator. Contudo, o sistema RLFB pode operar em condições ótimas de excesso de ar não alterando a temperatura no leito fluidizado, mantendo os padrões de operação, bem como elevadas as eficiências de combustão (Tabela 3). Dessa forma, a cocombustão das biomassas proporcionou uma redução significativa nas emissões de SO₂ sem causar elevadas emissões de CO.

Nas Figuras 3(a), 3(b), 3(c) e 3(d), são apresentadas as concentrações de SO₂ e NO_x para as composições de misturas CC/RCA e CC/RCE testadas nos ensaios de cocombustão. Observa-se que, em todos os experimentos, os limites de emissão de

SO_2 e NO_x mantiveram-se abaixo dos valores estabelecidos pela legislação ambiental, com exceção da emissão de SO_2 para o teste com RCE40 e RCE60 (40% e 60% de eucalipto na alimentação, respectivamente) que ficaram acima do limite estabelecido pela FEPAM (2018). Ainda, o teste com 40% de RCA na alimentação (RCA40) apresentou emissão levemente acima do limite ambiental. Por fim, pode ser observado, nas Figuras 3c e 3d, que os valores de concentração de NO_x nas emissões mantiveram-se abaixo do limite de emissão estabelecido pela legislação ambiental (400 mg/Nm^3) para todas as condições dos ensaios testados.

Figura 3 – Concentrações de SO_2 e NO_x para as composições de misturas de CC e RCA e CC e RCE aplicadas nos ensaios de cocombustão em planta piloto



Fonte: Autores (2023)

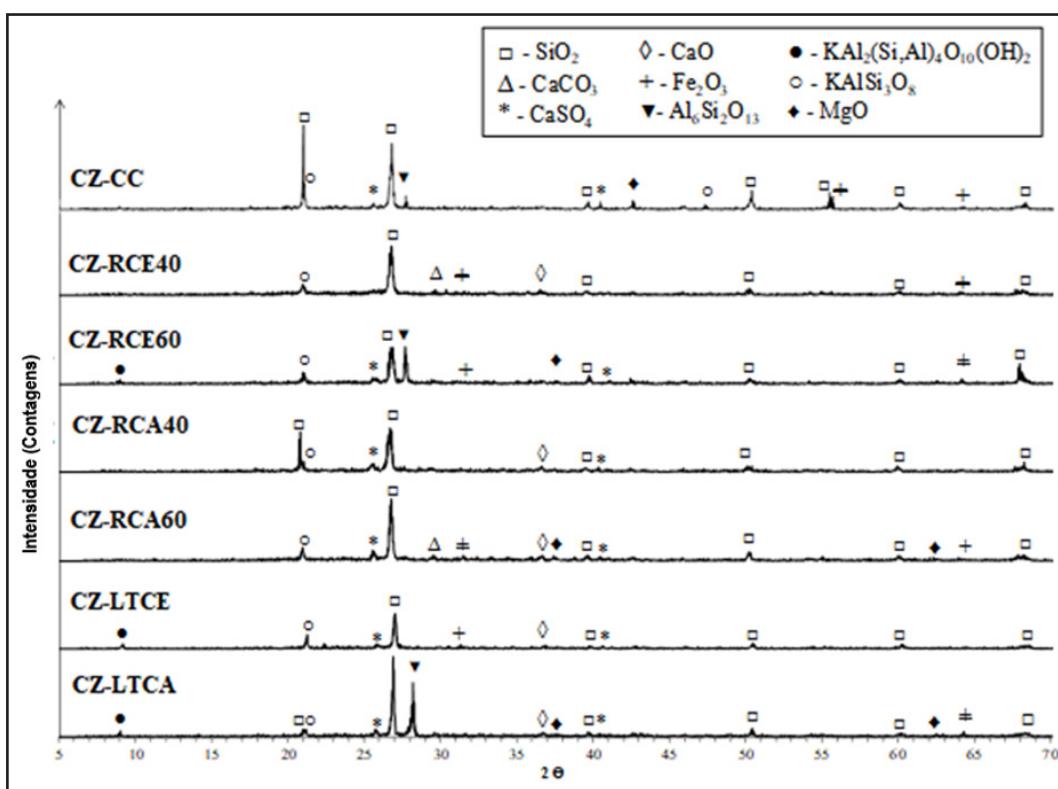
3.2 Caracterização das cinzas

A Figura 4 apresenta os difratogramas de raios X (DRX) da amostra CZ-CC (cinzas volantes dos testes de combustão com CC), das amostras dos testes de cocombustão

CZ-RCE40, CZ-RCE60, CZ-RCA40 e CZ-RCA60 (cinzas volantes dos testes de combustão com RCE40, RCE60, RCA40 e RCA60, respectivamente), e das amostras das cinzas de fundo do leito fluidizado após os testes com CC e RCA (CZ-LTCA) e após os testes com CC e RCE (CZ-LTCE). Os difratogramas indicaram a presença de quartzo (SiO_2) como a principal fase nas cinzas. A influência das biomassas, com a substituição parcial do carvão nas amostras para cocombustão, indicou a diminuição nos picos característicos de SiO_2 . Além do quartzo, as principais fases identificadas nas cinzas foram o óxido de cálcio (CaO), o silicato de alumínio ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$), o feldspato alcalino (KAlSi_3O_8) e a anidrita (CaSO_4). Não foram identificados sulfatos de magnésio nos difratogramas das cinzas analisadas. Isso provavelmente ocorre porque os sulfatos de outros elementos, como MgSO_4 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ e K_2SO_4 , são termicamente menos estáveis quando comparados com o CaSO_4 (Cheng *et al.*, 2003; Shao *et al.*, 2012; Fae *et al.*, 2016).

Os difratogramas das cinzas da biomassa RCA a 60% (CZ-RCA60) e das cinzas do leito mostraram a presença de óxido de cálcio (CaO) como uma nova fase cristalina, o que não foi constatado nas cinzas de combustão de CC (CZ-CC). O composto óxido de magnésio (MgO) foi identificado nas cinzas volantes dos testes realizados com maiores porcentagens de biomassas (CZ-RCA60 e CZ-RCE60) e nas cinzas do leito após os testes com RCA (CZ-LTCA). Óxido de magnésio é um mineral secundário que pode ter se formado a partir da decomposição da dolomita ou pela oxidação do magnésio presente na composição da biomassa (Varol; Atimtay; Olgun, 2014). Todos os difratogramas, mostrados na Figura 4, apresentaram picos de anidrita (CaSO_4) com exceção do difratograma da amostra CZ-RCE40. Enquanto o silicato de alumínio na forma de muscovita ($\text{KAl}_2(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) foi identificado nas cinzas da cocombustão de RCE a 60% (CZ-RCE60) e nas cinzas do leito após os testes com CC e RCA (CZ-LTCA) e após os testes com CC e RCE (CZ-LTCE). A presença de muscovita nas cinzas é relevante, tendo em vista que as mesmas podem ser utilizadas na construção civil, na fabricação de eletrônicos ou mesmo na síntese de zeólitas.

Figura 4 – Difratogramas DRX das cinzas geradas após os testes de cocombustão em planta piloto



Fonte: Autores (2023)

Em que: Onde: CZ-CC = cinzas do carvão de Candiota; CZ-RCE40 = cinzas da cocombustão de RCE a 40%; CZ-RCE60 = cinzas da cocombustão de RCE a 60 %; CZ-RCA40 = cinzas da cocombustão de RCA a 40%; CZ-RCA60 = cinzas da cocombustão de RCA a 60 %; CZ-LTCE = cinzas do leito após os testes de cocombustão de RCE e CZ-LTCA = cinzas do leito após os testes de cocombustão com RCA

A Tabela 4 mostra os resultados da análise de fluorescência de raios-X das cinzas volantes. Observa-se que as cinzas da queima de carvão mineral (CC) têm os maiores teores de óxido de silício (SiO_2) em comparação com as outras amostras. As cinzas da cocombustão (CZ-RCA40, CZ-RCA60, CZ-RCE40 e CZ-RCE60) apresentam altos teores de óxidos de silício, alumínio, ferro, cálcio e magnésio. Houve aumento no teor dos óxidos de ferro, cálcio e magnésio, devido à presença desses elementos na composição das biomassas, e uma diminuição no teor do óxido de silício em comparação com as cinzas do carvão mineral (CC). Isso favorece o processo de dessulfuração, corroborando os resultados dos difratogramas de DRX mostrados na Figura 4. A análise não mostrou teores significativos de compostos alcalinos, como potássio e sódio, que poderiam

favorecer a formação de depósitos no sistema de saída de gases. Em estudo de Nunes (2019), altos teores de óxido de sódio foram associados à formação de escória e incrustações em caldeiras, o que não se observou neste estudo.

Tabela 4 – Análise FRX das amostras das cinzas dos testes realizados na planta piloto

Óxidos (%)	Cinzas Volantes					Cinzas de Fundo (Leito)	
	CZ-CC	CZ-RCA40	CZ-RCA60	CZ-RCE40	CZ-RCE60	CZ-LTCA	CZ-LTCE
SiO ₂	66,67	39,73	40,80	49,52	41,18	48,56	46,92
Al ₂ O ₃	17,69	13,85	15,53	28,05	19,50	17,81	21,19
Fe ₂ O ₃	5,24	9,36	9,97	9,69	17,53	7,29	8,48
CaO	2,92	15,94	19,14	4,40	9,03	14,90	12,34
MgO	0,25	2,03	2,22	1,22	1,85	4,47	2,30
SO ₃	3,64	14,92	7,75	3,36	3,82	4,70	4,75
K ₂ O	2,31	1,67	2,00	1,92	3,44	1,78	2,25
TiO ₂	1,09	1,46	1,40	1,14	2,58	0	0,97
Na ₂ O	0	0,24	0,26	0,26	0,53	0,23	0,30
ZrO ₂	0,02	0,06	0,06	0,11	0,11	0,08	0,06
P ₂ O ₅	0,07	0,37	0,43	0,07	0,13	0	0,07
ZnO	0,02	0,07	0,12	0,06	0,09	0,04	0,12
MnO	0,04	0,10	0,10	0,05	0,11	0,06	0,11
SrO	0,01	0,17	0,15	0,05	0,06	0,04	0,06
Rb ₂ O	0,01	0,03	0,03	0,03	0	0,03	0,04
Y ₂ O ₃	0,01	0	0	0,03	0,04	0,01	0,01
NiO	0,00	0	0,03	0,03	0	0	0,03
Co ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0
CuO	0	0	0	0	0	0	0
Cr ₂ O ₃	0,02	0	0	0	0	0	0

Fonte: Autores (2023)

Em que: Onde: CZ-CC = cinzas do carvão de Candiota; CZ-RCE40 = cinzas da cocombustão de RCE a 40%; CZ-RCE60 = cinzas da cocombustão de RCE a 60 %; CZ-RCA40 = cinzas da cocombustão de RCA a 40%; CZ-RCA60 = cinzas da cocombustão de RCA a 60 %; CZ-LTCE = cinzas do leito após os testes de cocombustão de RCE e CZ-LTCA = cinzas do leito após os testes de cocombustão com RCA

As análises das amostras de cinzas do leito que foram coletadas após os testes de cocombustão com as biomassas RCA (CZ-LTCA) e RCE (CZ-LTCE) são apresentadas na Tabela 4. Observa-se a predominância dos óxidos de silício (SiO₂) e de alumínio (Al₂O₃).

Com relação aos óxidos alcalinos, foram encontradas concentrações relativamente baixas para os óxidos de sódio (Na_2O) e de potássio (K_2O). Assim, constata-se que problemas associados à formação de depósitos podem ser reduzidos ou evitados com a utilização das biomassas RCA e RCE no processo de cocombustão com carvão Candiota. Segundo Vassilev (2013), as cinzas retidas no gás de combustão formam partículas de cinza grossas que ficam depositadas no leito, normalmente, compostas pelos elementos principais e secundários formadores das biomassas como Ca, Mg, Si, Al e algum material orgânico não queimado.

A Tabela 5 apresenta as temperaturas características de fusão das amostras de cinzas volantes e de cinzas do leito. Conforme se constata na referida tabela, os valores da temperatura de deformação inicial (DT), temperatura de amolecimento (ST), temperatura hemisférica (HT) e temperatura de fluxo (FT) foram superiores aos valores encontrados por Rizvi *et al.* (2015), que estudaram o comportamento das temperaturas de fusão em cinzas de resíduos de Madeira, casca de amendoim, casca de girassol e resíduos vegetais (gramíneas) utilizados na geração de energia. As temperaturas características de fusão estão ligadas à presença dos elementos que constituem a formação de compostos inorgânicos nas cinzas, como $\text{KAlSi}_2\text{O}_6(\text{S}_2)$, $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7(\text{S})$, $\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{O}_{12}(\text{S})$. A presença desses compostos nas cinzas favorece a fusão das mesmas em temperaturas mais baixas, entre 1100 °C e 1300 °C (Rizvi *et al.*, 2015). Contudo, apesar das elevadas concentrações dos óxidos de Si, Al e Fe e da presença dos óxidos de S, Ca e K (Tabela 4), as cinzas amostradas não apresentaram a formação dos compostos inorgânicos supracitados (Figura 4).

Ainda, conforme se constata na Tabela 5, a temperatura na qual ocorreu a fusão (FT) das cinzas do CC foi acima de 1500°C, enquanto para a cinzas da cocombustão os valores de FT ficaram entre 1284°C e 1457°C. Os altos valores de FT das cinzas das biomassas com o carvão de Candiota são importantes, visto que reduzem o risco de ocorrência de problemas associados à formação de depósitos e de aglomeração nos equipamentos, pois o processo de cocombustão do leito fluidizado ocorre em temperaturas em torno de 850°C.

Tabela 5 - Temperatura de fusão das cinzas de CC, das cinzas de cocombustão de CC com as biomassas RCA e RCE e das cinzas de fundo do leito fluidizado

Nomenclatura do Teste	DT (°C)	ST (°C)	HT (°C)	FT (°C)
CZ-CC	1161	1217	1225	>1500
CZ-RCA40	1329	1381	1417	1457
CZ-RCA60	1279	1374	1410	1436
CZ-RCE40	1234	1247	1257	1284
CZ-RCE60	1183	1253	1268	1312
CZ-LTCA	1187	1246	1255	1367
CZ-LTCE	1210	1257	1266	1384

Fonte: Autores (2023)

Em que: DT = Temperatura de deformação (°C); ST = Temperatura de esfera (°C); HT = Temperatura de semi-esfera (°C); FT = Temperatura de fusão (°C); CZ-CC = cinzas do carvão de Candiota; CZ-RCE40 = cinzas da cocombustão de RCE a 40%; CZ-RCE60 = cinzas da cocombustão de RCE a 60 %; CZ-RCA40 = cinzas da cocombustão de RCA a 40%; CZ-RCA60 = cinzas da cocombustão de RCA a 60 %; CZ-LTCE = cinzas do leito após os testes de cocombustão de RCE e CZ-LTCA = cinzas do leito após os testes de cocombustão com RCA.

Ante o exposto, os resultados de caracterização das cinzas geradas mostraram uma temperatura de fusão alta, acima de 1280 °C. Isso diminui o risco de problemas, como incrustação e entupimento dos equipamentos quando se utiliza as biomassas RCA e RCE com o carvão Candiota (CC) na cocombustão. Devido a essa alta temperatura de fusão, é improvável que ocorram dificuldades relacionadas à formação de depósitos nos equipamentos durante o processo de cocombustão em leito fluidizado, que ocorre em temperaturas em torno de 850 °C. Por fim, este estudo recomenda que um reator de leito fluidizado borbulhante em escala piloto pode operar dentro dos limites de emissão estabelecidos pela legislação ambiental usando o processo de cocombustão de carvão nacional com alto teor de enxofre e cinzas, junto com resíduos de biomassa florestal como da casca de acácia-negra. Também, que o sistema piloto pode operar com padrões de excesso de ar sem mudar a temperatura no leito fluidizado, mantendo as condições de operação estáveis e eficiências de combustão elevadas. Por fim, este estudo pode servir como base para desenvolvimentos em escala piloto e industrial em aplicações de leito fluidizado borbulhante.

4 CONCLUSÕES

O reator de leito fluidizado borbulhante em planta piloto foi testado com sucesso para o processo de cocombustão de carvão mineral de Candiota (CC) com alto teor de enxofre, cinzas e biomassas florestais de cavaco de eucalipto (RCE) e casca de acácia-negra (RCA). Diversas frações em massa de carvão e de biomassas foram alimentadas no reator e parâmetros operacionais do processo de cocombustão e de emissão de gases foram avaliados, bem como a caracterização dos combustíveis e das cinzas geradas.

A cocombustão do carvão mineral (CC) e do resíduo da casca de acácia (RCA) resultou em uma redução superior a 90 % na concentração do composto SO₂ nos gases produzidos, em comparação com o uso de carvão puro. Os valores obtidos para o composto ficaram abaixo do limite de emissão estabelecido pelo órgão ambiental do Rio Grande do Sul.

Com relação à concentração dos compostos NOx e CO nos gases de combustão, os testes não apresentaram variações expressivas nas emissões, sendo os teores considerados baixos e dentro dos limites estabelecidos pelo órgão ambiental. Desse modo, a cocombustão de carvão com biomassa resultou em uma redução expressiva nas emissões de SO₂, sem acarretar um aumento considerável nas emissões de NOx e CO.

REFERÊNCIAS

ASADIERAGHI, M.; WAN DAUD, W. M. A. Characterization of lignocellulosic biomass thermal degradation and physiochemical structure: Effects of demineralization by diverse acid solutions. **Energy Conversion and Management**, v. 82, p. 71–82, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.007>.

ÁVILA, I.; CRNKOVIC, P. M.; LUNA, C. M. R.; MILIOLI, F. E. Use of a fluidized bed combustor and thermogravimetric analyzer for the study of coal ignition temperature. **Applied Thermal Engineering**, v. 114, p. 984–992, 2017.

ATIMTAY, A. T.; KAYNAK, B. Co-combustion of peach and apricot stone with coal in a bubbling fluidized bed. **Fuel Processing Technology**, v. 89, p. 183-197, 2008.

CRELLING, J. C.; HIPPO, E. J.; WOERNER, B. A.; WEST, D. P. Combustion characteristics of selected whole coals and macerals. **Fuel**, v. 71, n. 2, p. 151–158, 1992.

CHENG, J.; ZHOU, J.; LIU, J.; ZHOU, Z.; HUANG, Z.; CAO, X.; ZHAO, X.; CEN, K. Sulfur removal at high temperature during coal combustion in furnaces: A review. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 29, n. 5, p. 381–405, 2003.

DUMORTIER, J. Co-firing in coal power plants and its impact on biomass feedstock availability, **Energy Policy**, v. 60, p. 396–405, 2013.

EDREIS, E. M. A.; LUO, G.; LI, A.; CHAO, C.; HU, H.; ZHANG, S.; GUI, B.; XIAO, L.; XU, K.; ZHANG, P.; YAO, H. CO₂ co-gasification of lower sulphur petroleum coke and sugar cane bagasse via TG-FTIR analysis technique. **Bioresource Technology**, v. 136, p. 595–603, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.02.112>.

EOM, I. Y.; KIM, K. H.; KIM, J.Y.; LEE, S.M.; YEO, M. H.; CHOI I.G.; CHOI, J.W. Characterization of primary thermal degradation features of lignocellulosic biomass after removal of inorganic metals by diverse solvents, **Bioresource Technology**, v. 102, n. 3, p. 3437–3444, 2011.

FAÉ GOMES, G. M.; VILELA, A. C. F.; ZEN, L. D.; OSÓRIO, E. Aspects for a cleaner production approach for coal and biomass use as a decentralized energy source in southern Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 47, p. 85–95, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.037>.

FEPAM. **Controle de Emissões Atmosféricas para Fontes Fixas**. Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler/RS (FEPAM), Diretriz, p. 33, 2020.

FLEGKAS, S.; BIRKELBACH, F.; WINTER, F.; FREIBERGER, N.; WERNER, A. Fluidized bed reactors for solid-gas thermochemical energy storage concepts - Modelling and process limitations. **Energy**, v. 143. p. 615–623, 2020.

GIESBRECHT, B. M.; COLDEBELLA, R.; GENTIL, M.; NUNES, G. R. S.; FINGER, M. R.; JARDIM, J., PEDRAZZI, C.; CARDOSO, G. V. Performance da madeira de *Acacia mearnsii* De Wild para polpação kraft. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 1, p. 266–286, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509850295>.

GOLDFARB, J. L.; CEYLAN, S. Second-generation sustainability: Application of the distributed activation energy model to the pyrolysis of locally sourced biomass-coal blends for use in co-firing scenarios, **Fuel**, v. 160. p. 297–308, 2015.

HENNE, R. A.; BRAND, M. A.; SHEIN, V. A. S.; PEREIRA, E. R.; SCHVEITZER, B. Characterization of Ashes From Forest Biomass Combustion in Boilers: A Systemic View of Potential Applications. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 50, n. 1, p. 1073 - 1082, jan/mar 2020. DOI: <https://doi.org/10.5380/rf.v50i1.61229>.

HUANG, Y. F.; KUAN, W. H.; CHIUEH, P. T.; LO, S. L. Pyrolysis of biomass by thermal analysis-mass spectrometry (TA-MS). **Bioresource Technology**, v. 102, n. 3, p. 3527–3534, 2011.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da extração vegetal e da silvicultura 2015**. Produção da extração vegetal e da silvicultura, v, 30, p, 48, 2016.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Coal.** Disponível em: <http://www.iea.org/topics/coal/>. Acesso em: 18 ago. 2021.

JIANG, L.; HU, S.; SUN, L.S.; SU, S.; XU, K.; HE, L.M.; XIANG, J. Influence of different demineralization treatments on physicochemical structure and thermal degradation of biomass, **Bioresource Technology**, v. 146, p, 254–260, 2013.

LIU, H.; CHANEY, J.; LI, J.; SUN, C. Control of NOx emissions of a domestic/small-scale biomass pellet boiler by air staging. **Fuel**, v. 103, p. 792-798, 2013.

MADANAYAKE, B.; N.; GAN, S.; EASTWICK, C.; NG, H.; K. Biomass as an energy source in coal co-firing and its feasibility enhancement via pre-treatment techniques. **Fuel Processing Technology**, v. 159, p. 287-305, 2017.

KHAN, A. A.; DE JONG, W.; JANSENS, P. J.; SPLIETHOFF, H. Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. **Fuel Processing Technology**, v. 90, n. 1, p. 21–50, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.07.012>.

KUMAR, H.; MOHAPATRA, S, K.; SINGH, R. I. Study of a 30 MW bubbling fluidized bed combustor based on co-firing biomass and coal, Sadhana. **Academy Proceedings in Engineering Sciences**, v, 40, n, 4, p, 1283–1299, 2015.

KUPRIANOV, V. I.; JANVIJITSAKUL, K.; PERMCHART, W. Co-firing of sugar cane bagasse with rice husk in a conical fluidized-bed combustor, **Fuel**, v, 85, n, 4, p, 434–442, 2006.

MAGGI, B.; NOVACKI, E. R.; ARAÚJO, W. V.; ANJOS, J. M.; SALOMÃO, J. A. F. **Plano Nacional de desenvolvimento de Florestas Plantadas**. Brasil, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, p. 52, 2018.

NUNES, K. G. P.; OSÓRIO, E.; MARCÍLIO, N. R. Kinetics of the Oxy-fuel Combustion of High-Ash-Content Coal from the Candiota Mine, Rio Grande do sul. **Energy and Fuels**, v. 30, n. 3, p. 1958–1964, 2016.

NUNES, L. J. R.; GODINA, R.; MATIAS, J. C. O.; CATALÃO, J. P. S. Evaluation of the utilization of woodchips as fuel for industrial boilers. **Journal of cleaner production**, v. 223, p. 270–277, 2019.

NUNES, L. J. R.; MATIAS, J. C. O.; CATALÃO, J. P. S. Biomass waste co-firing with coal applied to the Sines Thermal Power Plant in Portugal, **Fuel**, v, 132, p, 153–157, 2014.

PÉCORA, A. A. B. B.; ÁVILA, I.; LIRA, C. S.; CRUZ, G.; CRNKOVIC, P. M. Prediction of the combustion process in fluidized bed based on physical-chemical properties of biomass particles and their hydrodynamic behaviors. **Fuel Processing Technology**, v. 124, p. 188–197, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.03.003>.

RIZVI, T.; XING, P.; POURKASHANIAN, M.; DARVELL, L. I.; JONES, J. M.; NIMMO, W. Prediction of biomass ash fusion behaviour by the use of detailed characterisation methods coupled with thermodynamic analysis. **Fuel**, v. 141, p. 275-284, 2015.

RUHUL KABIR, M.; KUMAR, A. Comparison of the energy and environmental performances of nine biomass/coal co-firing pathways, **Bioresource Technology**, v. 124, p. 394–405, 2012.

SAIDUR, R.; ABDELAZIZ, E. A.; DEMIRBAS, A.; HOSSAIN, M.S.; MEKHILEF, S. A review on biomass as a fuel for boilers. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 15, n. 5, p. 2262–2289, 2011.

SANCHEZ-SILVA, L.; LÓPEZ-GONZÁLEZ, D.; VILLASEÑOR, J.; SÁNCHEZ, P.; VALVERDE, J. L. Thermogravimetric-mass spectrometric analysis of lignocellulosic and marine biomass pyrolysis. **Bioresource Technology**, v. 109, p. 163–172, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.001>.

SHAO, Y.; J.; WANG, J.; PRETO, F.; ZHU XU, C. Ash deposition in biomass combustion or co-firing for power/heat generation. **Energies**, v. 5, n. 12, p. 5171–5189, 2012.

SILVA FILHO, C. G. da; MILIOLI, F. E. A thermogravimetric analysis of the combustion of a Brazilian mineral coal. **Química Nova**, v. 31, n. 1, p. 98–103, 2008.

SOUZA, C. de O.; ARANTES, M. D. C.; PINTO, J. de A.; SILVA, J. G. M. da; CARNEIRO, M. F.; LIMA, A. C. B. de; PASSOS, R. R. Qualidade dos resíduos madeireiros de mogno-africano e eucalipto para briquetagem. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 2, p. 637–652, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509843299>.

SUN, P.; HUI, S.; GAO, Z.; ZHOU, Q.; TAN, H.; ZHAO, Q.; XU, T. Experimental investigation on the combustion and heat transfer characteristics of wide size biomass co-firing in 0.2 MW circulating fluidized bed. **Applied Thermal Engineering**, v. 52, 284–292, 2013.

TEIXEIRA, J. M. C.; SILVA, S. A.; PINHEIRO, H. S.; NOGUEIRA, R.E.F.Q.; ALBUQUERQUE, J. S. V.; PINHO, R.G. Estudo dos produtos da combustão do Carvão mineral visando seu aproveitamento como material cerâmico. **Anais Congresso Técnico da Engenharia e da Agronomia**, n. 1, 2015.

VAMVUKA, D.; KAKARAS, E.; KASTANAKI, E.; GRAMMELIS, P. Pyrolysis characteristics and kinetics of biomass residuals mixtures with lignite. **Fuel**, v. 82, n. 15–17, p. 1949–1960, 2003.

VAMVUKA, D.; SFAKIOTAKIS, S.; KOTRONAKIS, M. Fluidized bed combustion of residues from oranges' plantations and processing. **Renewable Energy**, v. 44, p. 231–237, 2012.

VAN DE VELDEN, M.; BAEYENS, J.; BREMS, A.; JANSSENS, B.; DEWIL, R. Fundamentals, kinetics and endothermicity of the biomass pyrolysis reaction. **Renewable Energy**, v. 35, n. 1, p. 232–242, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.04.019>.

VAN LOO, S.; KOPPEJAAN, J. **The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing**. Earthscan, 2008.

VAROL, M.; ATIMTAY, A. T.; OLGUN, H.; ATAÇÜL, H. Emission characteristics of co-combustion of a low calorie and high sulfur-lignite coal and woodchips in a circulating fluidized bed combustor: Part 1. Effect of excess air ratio. **Fuel**, v. 117, n. PART A, p. 792–800, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.09.051>.

VAROL, M.; SYMONDS, R.; ANTHONY, E. J.; LU, D.; JIA, L.; TAN, Y. Emissions from co-firing lignite and biomass in an oxy-fired CFBC. **Fuel Processing Technology**, v. 173, p. 126-133, 2018.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; VASSILEVA, C. G. An overview of the behaviour of biomass during combustion: part ii. ash fusion and ash formation mechanisms of biomass types. **Fuel**, v. 117, p. 152-183, 2013.

WANDER, P. R.; BIANCHI, F. M.; CAETANO, N. R.; KLUNK, M. A.; INDRUSIAK, M. S. Cofiring low-rank coal and biomass in a bubbling fluidized bed with varying excess air ratio and fluidization velocity. **Energy**, v. 203, p. 117882, 2020.

Contribuição de Autoria

1 Felipe de Aguiar de Linhares

Engenheiro Químico, Mestre em Engenharia Química

<https://orcid.org/0000-0002-3801-2790> • felipelinhares85@hotmail.com

Contribuição: Curadoria de dados; Análise de dados; Pesquisa; Disponibilização de ferramentas; Metodologia; Administração do projeto; Redação do manuscrito original; Escrita – revisão e edição

2 Keila Guerra Pacheco Nunes

Engenheira Química, Doutora em Engenharia Química

<https://orcid.org/0000-0001-7332-096X> • keilagpn@gmail.com

Contribuição: Análise de dados; Validação de dados e experimentos; Metodologia; Design da apresentação de dados; Escrita – revisão e edição

3 Pedro Juarez Melo

Engenheiro Químico, Doutor em Engenharia Química, Professor

<https://orcid.org/0000-0001-6176-9364> • pedro.melo@ufrgs.br

Contribuição: Supervisão; Análise de dados; Escrita – revisão e edição; Validação de dados e experimentos; Design da apresentação de dados

4 Nilson Romeu Marcílio

Engenheiro Químico, Doutor em Engenharia Química, Professor

<https://orcid.org/0000-0003-1153-5492> • nilson@enq.ufrgs.br

Contribuição: Supervisão; Análise de dados; Metodologia; Validação de dados e experimentos; Design da apresentação de dados; Escrita – revisão e edição

Como citar este artigo

LINHARES, F. A.; NUNES, K. G. P.; MELO, P. J.; MARCÍLIO, N. R. Avaliação de emissões atmosféricas e cinzas geradas na cocombustão de carvão mineral com resíduos florestais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 34, n. 4, e83749, p. 1-27, 2024. DOI 10.5902/1980509883749. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509883749>. Acesso em: dia mês abreviado. ano.