

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE CASCA DE ARROZ, CAVACO DE EUCALIPTO E APARAS DE COURO PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA VIA CO-COMBUSTÃO

Evelin M. S. CASTRO^{1,2}; Luiz A. M. FONTOURA¹; Guilherme P. S. PRIEBE¹; Guilherme de SOUZA¹;

¹Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC), {mazzini, guilherme-priebe, guilherme-souza} @cientec.rs.gov.br; ²Universidade Luterana do Brasil (ULBRA), evelin.saibro@hotmail.com;

RESUMO

Atualmente vem crescendo o interesse pelo uso de combustíveis sólidos renováveis e alternativos como biomassas que se constituem em rejeitos de processos industriais. O presente trabalho visa investigar o aproveitamento de resíduos de origem vegetal e animal, como casca de arroz, cavaco de eucalipto e aparas de couro, com o objetivo de avaliar o seu potencial para uso nos processos de co-geração. Os combustíveis foram caracterizados por meio de análise imediata, análise elementar, poder calorífico e termogravimetria. Os ensaios de co-combustão com diferentes concentrações carvão:biomassa foram realizados por termogravimetria e por avaliação em reator de leito fixo aquecido em forno tubular elétrico. Foram avaliados teores entre 20 e 30 % em massa de biomassa misturada ao carvão mineral extraído da Mina de Candiota. Em comparação com a combustão de carvão mineral, a temperatura de combustão variou moderadamente quando o processo de co-combustão foi conduzido em termobalança, com alteração proporcional à quantidade de biomassa inserida no processo. Conforme esperado pela análise imediata, a quantidade de resíduos (cinzas) também diminuiu de maneira mais significativa com o aumento do teor de biomassa no processo de co-combustão. A avaliação em forno tubular foi realizada em atmosfera de ar sintético com análise contínua dos gases de combustão para fins de avaliação das emissões gasosas do processo de co-combustão comparativamente ao processo de combustão de carvão mineral de Candiota. Observou-se uma sensível diminuição no teor de SO₂ para a (co-)combustão de casca de arroz e cavaco de eucalipto. O resultado é esperado em função do teor inferior de enxofre presente nestes combustíveis comparados ao carvão mineral, conforme determinado na análise elementar. Além de evidenciar a relevância e pertinência deste processo de co-combustão para geração de energia, o trabalho forneceu informações importantes para fins de operação com estes combustíveis em unidades de maior escala.

Palavras-chave: Biomassa. Carvão Mineral. Co-combustão. Emissões atmosféricas.

ABSTRACT

There is an increasing interest on the use of renewable and alternative solid fuels such as biomass derived from wastes generated by industry. The potential for using vegetable and animal-derived residues such as rice husk, eucalyptus chips and leather shavings as feedstock for cogeneration processes was investigated in the present work. The feedstocks were characterized by proximate analysis, ultimate analysis, calorific value and thermogravimetry. The cofiring tests with different coal:biomass ratios were performed by thermogravimetry and by evaluation in a fixed bed reactor placed in a tubular electric furnace. Approximately 20 or 30 wt. % of biomass was mixed with coal derived from the Candiota mine for the cofiring tests. The combustion temperature varied moderately during the cofiring tests performed in a thermobalance in comparison to the combustion of coal. These changes in the ignition temperature were proportional to the biomass loadings. As expected by the proximate analysis, the quantity of ash significantly decreased with increasing biomass loadings in the cofiring tests. The evaluation in the electric furnace was conducted under synthetic air flow with continuous analysis of the gas composition in order to compare the gas emissions of the cofiring and the coal combustion processes. A strong decrease in the emission of SO₂ was noticed for the cofiring/combustion of rice husk and eucalyptus chips. These results were expected from the low content of sulfur in these feedstocks compared to coal as revealed by the ultimate analysis. In addition to pointing to the relevance and feasibility of using these biomasses for energy generation by cofiring, results herein reported provided interesting information for conducting these processes in higher scale plants.

Key-Words: Biomass. Coal. Cofiring. Atmospheric emissions.

1 INTRODUÇÃO

Assim como outros combustíveis fósseis, o carvão é composto por materiais orgânicos sólidos, fossilizados ao longo de milhões de anos e sua qualidade varia conforme o tipo e o estágio dos seus componentes orgânicos. Diferentes estágios de sua formação (turfa, lignito, sub-betuminoso, betuminoso, antracito e grafite) proporcionam diferentes conteúdos de carbono (ROHDE, 2006).

O carvão mineral apresenta grande relevância para a matriz energética mundial. Porém esse combustível fóssil apresenta algumas desvantagens devido às altas concentrações de enxofre e os grandes teores de cinzas, especialmente no caso dos carvões minerais das reservas localizadas na região Sul do Brasil (FAÉ GOMES *et al.*, 2015b).

O termo biomassa abrange todo recurso renovável proveniente de organismos vivos de origem animal ou vegetal que pode ser utilizado como combustível para produção de energia. Neste caso, através da fotossíntese, a energia solar, água e dióxido de carbono são convertidos em energia química. Um dos benefícios da biomassa é que seu aproveitamento pode ser feito de forma direta por processos termoquímicos, como, por exemplo, a sua combustão em fornos (ANEEL, 2005).

Alguns benefícios do uso de biomassa para produção de energia elétrica são baixo custo, fonte renovável, destinação aos resíduos e o fato de ser menos poluente comparado a outras fontes tradicionais (RIO GRANDE DO SUL, 2016).

Atualmente vem crescendo o interesse pelo uso de combustíveis sólidos renováveis e alternativos como biomassas que se constituem em rejeitos de processos industriais (MOTGHARE *et al.*, 2016). Além de ser renovável e agregar valor a um resíduo, a co-combustão envolvendo algumas biomassas permite minimizar emissões de poluentes como o dióxido de enxofre (SO₂). A avaliação de biomassas disponíveis em maiores quantidades no Estado do Rio Grande do Sul é relevante para

avaliar o seu potencial para gerar energia com minimização de emissões de SO₂ em vista o alto teor de enxofre no carvão das reservas em Candiota-RS.

Neste sentido, o presente trabalho visa investigar o aproveitamento de resíduos orgânicos de origem vegetal e animal gerados no Rio Grande do Sul, como casca de arroz (CA), cavaco de eucalipto (CE) e aparas de couro (AC), utilizando o processo de co-combustão com carvão mineral de Candiota-RS.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A parte experimental foi executada no Departamento de Engenharia de Processos da Fundação de Ciência e Tecnologia no Estado do RS. Foram utilizados os combustíveis carvão mineral extraído da mina de Candiota-RS (CC), casca de arroz (CA), aparas de couro de luvas (AC) e cavaco de eucalipto (CE). Este trabalho buscou a utilização de resíduos em sua forma bruta, não utilizando nenhum tratamento prévio como secagem ou torreficação.

As seguintes análises foram realizadas para o estudo dos combustíveis: análise elementar, análise imediata, determinação de poder calorífico, termogravimetria e ensaio de (co)combustão em forno tubular elétrico. A descrição das diferentes técnicas aplicadas é descrita nos subcapítulos que seguem.

2.1 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

A análise termogravimétrica (TGA) consiste na avaliação da perda de massa ao longo do tempo em um ambiente de temperatura e atmosfera controladas.

Tabela 1 – Proporções mássicas das amostras analisadas por TGA

Identificação da Amostra	100 (%)	Biomassa: Carvão 10:90 (%)	Biomassa: Carvão 20:80 (%)	Biomassa: Carvão 30:70 (%)
Casca de Arroz	CA			
Cavaco de Eucalipto	CE			
Aparas de Couro	AC			
Carvão mineral de Candiota	CC			
Casca de Arroz: Carvão		CC + CA 10%	CC + CA 20%	CC + CA 30%
Cavaco de Eucalipto: Carvão			CC + CE 20%	
Aparas de couro: Carvão			CC + AC 20%	

Fonte: Autoria própria (2017).

O presente estudo utilizou uma termobalança (Perkin Elmer, modelo TGA7) na qual uma massa aproximada de 15 mg de amostra era inserida em um cadinho suporte. A seguir, a temperatura do forno era aumentada a uma taxa de $5^{\circ}\text{C min}^{-1}$ até atingir 200°C , e, após, a taxa era alterada para $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$ e o aquecimento feito até 800°C , sob fluxo de ar sintético com uma vazão de 20 mL min^{-1} . Todas as amostras passaram por um moinho de facas (marca Marconi, modelo MA 340) com abertura das peneiras entre 10 e 32 mesh, para diminuição de sua granulometria devido às pequenas dimensões do cadinho da termobalança.

Através da análise termogravimétrica foram analisadas as amostras com diferentes proporções mássicas, conforme mostrado na Tabela 1.

2.2 ENSAIOS DE (CO)COMBUSTÃO EM REATOR DE LEITO FIXO ACOPLADO A FORNO TUBULAR

Os ensaios de (co)combustão em maior escala foram conduzidos em reator tubular de leito fixo acoplado a um forno tubular elétrico bipartido (marca Sanchis, modelo Tubular Vertical 25). Os testes foram realizados para a amostra de carvão mineral, para a casca de arroz e para a mistura de casca de arroz: carvão mineral na proporção 30:70. Desta maneira, foi possível realizar uma análise preliminar quanto às emissões de dióxido de enxofre no processo de co-combustão comparativamente ao processo de combustão de carvão mineral.

Os gases foram monitorados continuamente com um analisador portátil de gases de combustão (marca Bacharach) conectado à saída do reator. O ensaio consistiu no aquecimento de aproximadamente 1 g de combustível até 750°C

com uma taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$, sob atmosfera de 60 mL min^{-1} de ar sintético. Utilizou-se

2.3 CARACTERIZAÇÕES DOS SÓLIDOS

A caracterização dos combustíveis é de grande importância, pois permite avaliar as propriedades pertinentes para aplicações visando à geração de energia.

O presente estudo se dividiu em análise imediata, análise elementar e determinação do poder calorífico.

Os quantitativos referentes à umidade, matéria volátil, carbono fixo e cinzas foram determinados por análise imediata instrumental em equipamento da marca LECO modelo TGA600.

O teor dos elementos químicos carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio foi determinado em equipamento de marca LECO modelo CHN 600, enquanto que o teor de enxofre foi determinado em equipamento da marca LECO modelo SC 132.

O poder calorífico das amostras foi determinado em calorímetro marca PARR modelo 1281 automático.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SÓLIDOS

Na Tabela 2 estão apresentados os resultados de análise elementar, análise imediata e poder calorífico das amostras de carvão, casca de arroz, cavaco de eucalipto e aparas de couro.

Tabela 2 – Resultados de análise imediata, análise elementar e poder calorífico dos combustíveis (b.s. – base seca)

Análises	Parâmetro	Carvão mineral	Casca de arroz	Cavaco de eucalipto	Aparas de Couro
Análise Elementar (%) (b.s.)	C	33,71	41,01	49,23	44,38
	H	2,01	5,35	6,28	6,77
	O	8,15	32,78	40,17	22,62
	N	0,59	0,29	0,09	16,70
	S	1,45	0,09	n.d.	2,00
Análise Imediata (%) (b.s.)	Carbono fixo	22,34	12,81	12,40	12,62
	Cinza	54,49	20,48	4,23	7,53
	Material Volátil	23,17	66,71	83,37	79,85
	Umidade Higroscópica	4,11	4,31	5,06	17,30
Poder Calorífico (kcal kg^{-1}) (b.s.)	PCS	3055	3750	4475	4505
	PCI	2950	3475	4150	4155

Fonte: Autoria própria (2017).

A análise elementar apontou um teor de carbono, hidrogênio e oxigênio superior para todas as biomassas quando comparadas ao carvão mineral, o que também relaciona-se ao seu poder calorífico que se mostrou superior ao do carvão mineral de Candiota-RS. Resultados semelhantes nessas análises foram encontrados por Faé Gomes *et al.* (2013) para as amostras de carvão mineral gaúcho e casca de arroz, por Riehl (2015) para as aparas de couro e por Toledo *et al.* (2015) para o eucalipto.

O carvão mineral apresentou um teor de enxofre de 1,45%, que é compatível com o reportado para os carvões das reservas localizadas na região sul do Rio Grande do Sul (ROHDE, 2006). O conteúdo de enxofre para a casca de arroz foi muito baixo e para o cavaco de eucalipto apresentou concentrações abaixo do nível de detecção do equipamento (0,02%). As aparas de couro apresentaram 2% de enxofre. Assim, a análise elementar apontou para o cavaco de eucalipto e casca de arroz como biomassas promissoras para minimizar a emissão de SO₂ quando da sua co-combustão com o carvão mineral.

Nas medidas de poder calorífico, pode-se observar na Tabela 2 que o seu valor para os combustíveis seguiu a seguinte ordem: aparas de couro > cavaco de eucalipto > casca de arroz > carvão. A casca de arroz e o cavaco de madeira, ricos em matéria orgânica (celulose, hemicelulose e lignina), possuem elevada energia contida por unidade de massa. A lignina é uma substância que constitui a parede celular das plantas e que apresenta abundância de elementos carbono e hidrogênio, os quais liberam calor quando queimados, justificando o seu elevado poder calorífico (TAVARES & ALMEIDA, 2013; TOLEDO *et al.*, 2015). A pele que origina o couro é composta essencialmente de água, sais minerais, gordura natural e proteínas, juntamente com pequenas quantidades de pigmentos e carboidratos (PRIEBE, 2016), justificando o elevado poder calorífico determinado para as aparas de couro.

Outro fator importante para caracterizar os combustíveis é a análise imediata, onde se podem identificar os teores de umidade, cinzas, carbono fixo e material volátil da massa do combustível. O teor de umidade é a quantidade de água presente na biomassa, portanto ela influencia no aproveitamento energético da biomassa. Quanto maior o valor de umidade, menor será a quantidade de energia útil para o sistema de geração de energia. As análises identificaram a quantidade de umidade hidroscópica, ou seja, a capacidade que esses compostos tem de absorver água. A biomassa de aparas de couro mostrou maior valor, em torno de 17%, sugerindo que este material requiera um maior controle ou mesmo uma etapa de

secagem prévia ao seu uso em uma unidade para sua conversão térmica.

O teor de cinzas encontrado para o carvão na análise imediata foi de 54,5%, enquanto que o seu valor variou entre 4,23 e 20,48% para as biomassas. O teor de cinzas determinado para o carvão mineral de Candiota-RS está coerente com resultados reportados na literatura para carvões provenientes desta região (ROHDE, 2006). A proporção de cinzas afeta negativamente a produção de energia, pois a cinza não contribui para sua geração, embora alguns componentes da cinza possam atuar como catalisadores (TOLEDO *et al.*, 2015). As cinzas de carvão mineral possuem elevado teor de sílica e alumina (FLORES, 2016), ou seja, óxidos que não contribuem para gerar energia.

A quantidade material volátil expressa a facilidade de se queimar o material, sendo estes materiais desprendidos no início da combustão. Os seus principais componentes são: hidrogênio, hidrocarbonetos, monóxido de carbono e dióxido de carbono. Valores elevados de voláteis e teores baixos de cinza indicam, normalmente, maior poder calorífico (TAVARES & ALMEIDA, 2013; TOLEDO *et al.*, 2015), como se pode observar nas biomassas de cavaco de eucalipto e aparas de couro.

Assim, no geral, a Tabela 2 revelou que as três biomassas estudadas apresentam propriedades e composição interessantes para uso para fins energéticos. Ou seja, apresentaram valores de poder calorífico superiores ao do carvão mineral, menores teores de cinzas e, à exceção das aparas de couro, quantidades muito baixas de enxofre.

3.2 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

Os ensaios termogravimétricos se dividiram em análises de combustão das biomassas e co-combustão, onde se avaliou as biomassas em porcentagens de 10,20 e 30% em relação ao carvão mineral.

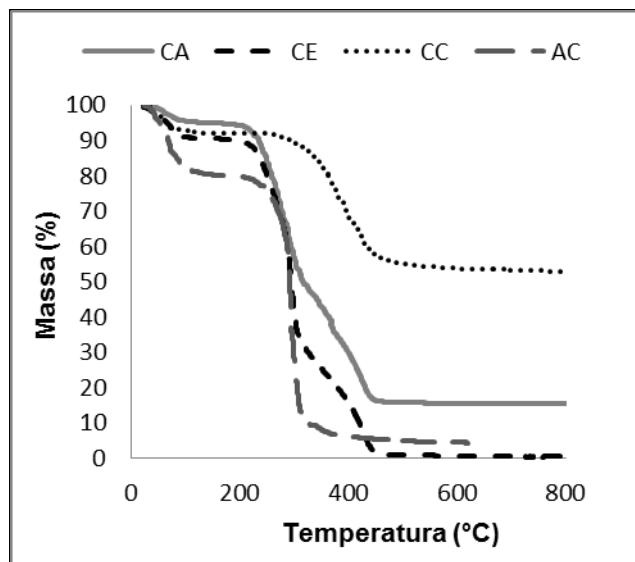
A Figura 2 mostra os termogramas de combustão das biomassas e do carvão. Pode-se observar que o carvão tem uma elevada perda de massa entre 350 e 600°C, totalizando 47% de diminuição de sua massa. As biomassas apresentam perda de massa mais significativa em temperaturas inferiores, ou seja, entre 250 e 400°C.

Na degradação térmica das biomassas de origem vegetal (CA e CE), três zonas bem definidas são observadas. A primeira etapa ocorre entre 50 e 100°C e associa-se à liberação de umidade. O segundo intervalo ocorre entre 250 a 400°C e refere-se à combustão de carboidratos (hemicelulose e celulose) e, acima de 400°C, ocorre a queima constante e lenta relacionada à lignina. Após a queima da lignina, permanecem apenas as cinzas

em quantidades que correspondem ao determinado nas análises imediatas mostradas na Tabela 2. As etapas correspondentes à conversão térmica de CA e CE estão coerentes com o esperado para estes combustíveis (e.g., ver RAMBO *et al.*, 2015).

As aparas de couro, não tendo sua origem em material vegetal, não possuem as mesmas etapas e temperaturas correspondentes a aquelas observadas para a casca de arroz e cavacos de eucalipto (vegetal). A sua combustão se encerra em temperaturas significativamente menores, além de apresentar maior perda de umidade em temperaturas até 120°C, conforme esperado pelas medidas de umidade higroscópica (Tabela 2).

Figura 2 – Curvas de combustão obtidas por TGA



Fonte: Autoria própria (2017).

A Tabela 3 mostra as derivadas das curvas de combustão obtidas por TGA. Enquanto que a casca de arroz apresenta uma curva de combustibilidade mais similar à exibida pelo carvão mineral, com picos máximos referentes à temperatura de combustão muito próximos, o cavaco de eucalipto e aparas de couro revelaram valores deslocados para temperaturas menores, podendo indicar condições de operação diferentes para a co-combustão com estes materiais.

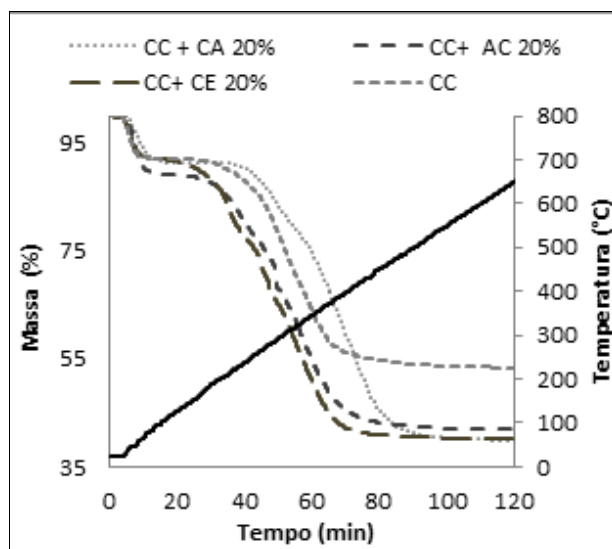
Tabela 3 - Resultados obtidos na análise TGA dos diferentes combustíveis

Amostra	T _{MAX} (°C)	Perda de massa total (%)
Casca de arroz – CA	372	84,4
Cavaco de eucalipto – CE	295	99,6
Aparas de couro - AC	293	95,6
Carvão mineral - CC	373	47,0

Fonte: Autoria própria (2017).

A Figura 3 apresenta o comportamento térmico dos testes contendo misturas de biomassa:carvão na razão 20:80. Identificaram-se perdas de massa superiores, entre 58,2 e 60,1 %, em comparação com o carvão que foi de 47%, conforme mostrado na Tabela 4. Para todos os testes de co-combustão, foi observado um efeito positivo da inserção de biomassa deslocando o pico de máximo de combustão (T_{MAX}) para temperaturas menores comparados a apenas o carvão mineral, embora a faixa de temperatura em que ocorre a combustão tenha sido similar para todos os testes. Conforme mostra a Figura 3 e esperado a partir das curvas TGA dos combustíveis individuais (Figura 2), a mistura de carvão e casca de arroz (i.e., CC + CA 20%) foi a que apresentou a curva de combustão encerrando-se em temperaturas maiores.

Figura 3 - Curvas de co-combustão das misturas biomassa: carvão = 20:80 obtidas por TGA



Fonte: Autoria própria (2017).

Tabela 4 - Resultados de TGA para os ensaios com as misturas biomassa:carvão = 20:80

Amostra	T _{MAX} (°C)	Perda de massa total (%)
CC + CA 20%	358	60,1
CC + CE 20%	358	59,8
CC + AC 20%	364	58,2

Fonte: Autoria própria (2017).

3.3 ENSAIOS DE (CO)COMBUSTÃO EM REATOR DE LEITO FIXO ACOPLADO A FORNO TUBULAR

Para o teste no forno tubular, foi escolhido realizar o estudo com a casca de arroz em mistura com o carvão devido ao potencial da casca de arroz no Estado do Rio Grande do Sul e pelo conhecimento de outros estudos sobre as propriedades e aproveitamento térmico deste recurso. Para o teste, foi adotada uma razão CA:CC maior (30 wt. %) para facilitar a visualização do efeito da biomassa sobre as emissões de SO₂ durante a co-combustão.

A Tabela 5 mostra os valores máximos alcançado de SO₂ e sua respectiva temperatura (T_{SO2}) nos testes em reator de leito fixo acoplado ao forno tubular.

Tabela 5 - Resultados de (co)combustão obtidos em reator tubular de leito fixo acoplado a forno tubular

Amostra	T _{SO2}	SO ₂ (ppm)
CC	710	173
CA	210	4
CC + CA 30%	330	139

Fonte: Autoria própria (2017).

Conforme determinado nas caracterizações (Tabela 2) e nos ensaios termogravimétricos das biomassas (e.g., Figura 2), as biomassas apresentam valores elevados de energia por unidade de massa (PCS) e de material volátil os quais fazem com que a combustão ocorra em temperaturas menores que o carvão mineral e sejam geradas menores quantidades de resíduos sólidos (cinzas), indicando assim combustíveis favoráveis para geração de energia.

Na análise elementar (Tabela 2), foi possível observar níveis muito baixos de enxofre para a amostra de casca de arroz e desprezíveis para o cavaco de eucalipto. Em função das propriedades e composição química da casca de arroz, a sua combustão emite quantidades de dióxido de enxofre sensivelmente inferiores às emitidas pelo carvão

mineral. O teste conduzido com análise contínua dos gases (Tabela 5) revela o efeito sinérgico que ocorre no processo de co-combustão de carvão mineral e casca de arroz. Neste processo, observou-se uma concentração de SO₂ intermediária entre ambos e em temperaturas menores ao do carvão mineral.

Assim, o resultado da Tabela 5 ilustra adequadamente o benefício desta estratégia, em que a introdução da biomassa permitiu a minimização da emissão de SO₂ e alteração no perfil de combustão do combustível (esta, mais claramente observada na Figura 3).

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho propôs a caracterização de diferentes resíduos (i.e., casca de arroz, cavaco de eucalipto e aparas de couro) e a avaliação preliminar do seu uso para fins de geração de energia.

As biomassas avaliadas apresentaram elevados valores de poder calorífico, mostrando a pertinência da avaliação para fins energéticos e baixo teor de cinzas, mostrando serem promissores para uso visando à geração de energia. À exceção das aparas de couro, as biomassas apresentaram baixo teor de umidade e praticamente isentas de enxofre.

A análise termogravimétrica mostrou que operações de co-combustão permitem reduzir a temperatura de combustão do combustível, o que se constitui em uma informação relevante para fins de operação em maior escala. Além disso, os testes em reator em forno tubular mostrou como a co-combustão permite um melhor controle das emissões atmosféricas de SO₂, o que é esperado pelo baixíssimo teor de enxofre exibido pela casca de arroz e cavaco de eucalipto, conforme determinado na análise elementar destes combustíveis.

5 REFERÊNCIAS

ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2. ed. 2005. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/download.htm>> Acesso em: 20 de março de 2017.

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, mai. 2013.

FAÉ GOMES, G.M.; PHILIPPSEN, C.G. ; BARD, E. K. ; DALLA ZEN, L. ; CAO, F. ; SOUZA, G. ; CASTRO, E. Fitting a bench scale to a bubbling pilot plant fluidized bed for biomass and coal/biomass cofiring. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLUIDIZED BED CONVERSION, 22., 2015, **Proceedings**. Turku: Abo Akademi University, v.2. p. 651-659, 2015a.

FAÉ GOMES, G.M.; PHILIPPSEN, C.G.; BARD, E. K.; SOUZA, G. Dolomite Desulfurization Behavior on a Bubbling Fluidized Bed Pilot Plant for High Ash Coal. **Brazilian Journal of Chemical Engineering (Impresso)**, v. 33, p. 319-332, 2015b.

MOTGHARE, K.A.; RATHOD, A. P.; WASEWAR, K.L.; LABHSETWAR, N.K. Comparative study of different waste biomass for energy application. **Waste Management**, v. 47-A, p. 40-45, jan. 2016.

DIEL RAMBO, M.K.; DIEL RAMBO, M.C.; ALMEIDA, K.J.C.R.; PEREIRA ALEXANDRE, G. Estudo de análise termogravimétrica de diferentes biomassas lignocelulósicas utilizando a análise por componentes principais. **Revista Ciência e Natura**, v.37, n.3, p.862-868, set./dez. 2015.

FLORES, C.G. **Síntese de zeólitas potássicas a partir de cinza de carvão e aplicação no cultivo de trigo**. 2016. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

PRIEBE, G.P.S. **Produção de biogás através da biodegradação anaeróbica de resíduos sólidos da indústria coureira**. 2015. p. 154. Tese de Doutorado (Programa de Pós-graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RIEHL, Alice. **Caracterização de resíduos de couro provenientes de um aterro industrial**. 2015. p. 139 Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2015.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria de Minas e Energia. **Plano energético do Rio Grande do Sul 2016/ 2025 – Fevereiro, 2016**. Disponível em: <<http://minasenergia.rs.gov.br/plano-energetico>> Acesso em: 22 de agosto de 2016.

ROHDE, G. M. Cinzas de Carvão Fóssil no Brasil: Restrições Ambientais e Medidas Mitigadoras. In: ROHDE, G. M. (Org.) *et al.* **Cinzas de Carvão Fóssil no Brasil – Volume I – Aspectos Técnicos e Ambientais**. Porto Alegre: CIENTEC, 2006. p. 137-186.

TAVARES, S.R.L.; SANTOS, T.E. Uso de diferentes fontes de biomassa vegetal para produção de biocombustíveis sólidos. **HOLOS**, Ano 29, v.5. p.19-27, dez. 2013.

TOLEDO, M; SANTOS, F.A.; MARÇAL, N.; ESPINOZA, M.; EICHLER, P.; VUELMA, J; FRIEDRICH, D. Estudo preliminar do potencial energético de variedades de eucalipto cultivadas no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Biomassa e Energia**, Curitiba: p.8-13, dez. 2015.