



## AVALIAÇÃO FLUIDODINÂMICA E CO-COMBUSTÃO DE RESÍDUO DE BIOMASSA INDUSTRIAL EM PLANTA DE BANCADA E PLANTA PILOTO DE LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE

*Felipe de Aguiar de Linhares<sup>1</sup> (felipelinhars85@hotmail.com), Gabriel Faé Gomes<sup>2</sup> (gmfae@unisinós.br), Nilson Romeu Marcílio<sup>1</sup> (nilson@enq.ufrgs.br), Pedro Juarez Melo<sup>1</sup> (pmelo@enq.ufrgs.br)*

1 UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (UFRGS)

2 UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS (UNISINOS)

### RESUMO

A questão ambiental levantada pelo uso de combustíveis fósseis para geração de energia tem levado a pesquisas na busca de alternativas para a redução das emissões de gases poluentes como CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>. O uso da biomassa em sistemas de co-combustão em leito fluidizado é mencionado como uma destas alternativas. O presente estudo utilizou resíduos de biomassa da indústria de extração de tanino, o Resíduo de Cascas de Acácia Negra (RCAN), em conjunto com carvão mineral da jazida de Candiota. O objetivo do trabalho é estudar a fluidodinâmica entre diferentes composições dos materiais em meio inerte (areia) de leito fluidizado de bancada e a avaliação das emissões dos gases gerados na co-combustão das misturas destes combustíveis em sistema planta piloto com reator de leito fluidizado borbulhante. Durante a fluidização das misturas de RCAN e areia, os valores experimentais da velocidade mínima de fluidização,  $U_{mf}$ , variaram consideravelmente em relação a mistura carvão/areia. Ao mesmo tempo, a queda de pressão,  $\Delta P$ , diminuiu com o aumento da concentração de biomassa no leito. A co-combustão do RCAN com carvão favoreceu a diminuição das concentrações de SO<sub>2</sub> nos gases gerados, mantendo as emissões em níveis aceitáveis (conforme os limites de emissão da resolução do CONAMA).

**Palavras - chave:** biomassa; fluidização; co-combustão.

## EVALUATION OF FLUIDIZATION AND CO-FIRE BIOMASS INDUSTRIAL WASTE LABORATORY-SCALE PLANT AND BUBBLY FLUIDIZED BED PILOT PLANT

### ABSTRACT

The environmental issues introduced by the use of fossil fuels for energy generation have led to research for alternatives to reduce gas emissions such as CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub>. The use of biomass in co-firing systems fluidized bed is mentioned as one of these alternatives. The study used biomass waste from tannin extraction industry, black wattle bark waste (BWBW), jointly with the coal from Candiota deposit. The aim of this work is to study the fluid dynamics between the compositions in inert bed (sand) using a laboratory fluidized bed and the evaluation emission gases generated in the co-firing mixtures using a pilot plant system with bubbling fluidized bed reactor. During fluidization of BWBW and sand mixtures, the experimental values of the minimum fluidization velocity,  $U_{mf}$ , diverse considerably in compare to coal/sand mixture. At the same time, the pressure drop,  $\Delta P$ , decreased with increasing concentration of biomass in the bed. The co-combustion of coal with RCAN favored the reduction of SO<sub>2</sub> concentrations in the generated gases maintaining emissions at acceptable levels (as Resolution of CONAMA limits).

**Keywords:** biomass, co-firing, fluidized bed.



## 1. INTRODUÇÃO

Crescentes preocupações sobre os impactos ambientais que envolvem a geração de energia a partir de combustíveis não renováveis estão a promover o desenvolvimento de meios mais sustentáveis de geração de energia. O uso da biomassa na co-combustão com carvão em leito fluidizado vem sendo mencionado como um dos principais meios de geração de energia sustentável utilizando combustíveis sólidos, entre os motivos estão a sua flexibilidade, estabilidade e eficiência (KHAN et al., 2009).

Neste contexto de produção de energia, entende-se por biomassa a fração biodegradável de produtos e resíduos provenientes da agricultura e da silvicultura, bem como de resíduos industriais e urbanos que possam ser utilizados como combustíveis ou para a sua produção (SELEMA, 2008). A biomassa é constituída principalmente de materiais orgânicos com composição polimérica, tal como a celulose, hemicelulose e lignina, a qual varia a cada material (IDEIAS, 2008). Um grande benefício da utilização de biomassa em processos de combustão quando em parceria ou em substituição dos combustíveis fósseis, se refere à diminuição das emissões dos gases causadores do efeito estufa. Tal fato se atribui a um balanço nulo nas emissões de CO<sub>2</sub>, que ocorre devido o carbono liberado para a atmosfera durante a sua combustão corresponder à quantidade que foi absorvida da atmosfera durante o processo de fotossíntese pela vegetação, que de um modo ou de outro, lhes deu origem (ABELHA, 2005).

Apesar de inúmeras investigações e estudos na área, o campo da co-combustão de biomassa e carvão ainda são insipientes e necessitam de fortes aportes financeiros em pesquisa e desenvolvimento. Nesse contexto, Vassilev (2015), descreveu dois aspectos fundamentais que envolvem a utilização de biomassa em processos de combustão: (i) ampliar e melhorar os conhecimentos básicos sobre a composição e propriedades destes, e (ii) aplicar esse conhecimento para a utilização mais avançada e sustentável da biomassa.

Madhiyanon et al. (2009) investigaram o desempenho da co-combustão de casca de arroz com carvão mineral em combustor de leito fluidizado com capacidade de geração de 120kWt. Foram avaliadas as características de combustão dos combustíveis em diferentes proporções, assim como suas eficiências. No mesmo ano, Sathitruangsak (2009) apresentou o desempenho da co-combustão de casca de arroz e carvão em reator semelhante, onde foram alimentados separadamente na câmara de combustão e avaliados em diferentes velocidades de fluidização. O estudo concluiu que a velocidade de fluidificação teve efeito positivo sobre as emissões dos gases, a exceção do NO<sub>x</sub>, e ainda, o tempo de queima dos combustíveis tornou-se insuficiente em velocidades mais elevadas, ocasionando queda na temperatura do leito.

No Brasil, são geradas elevadas quantidades anuais de resíduos orgânicos considerados com potencial de utilização como biomassa. Excepcionalmente no estado do Rio Grande do Sul, existe uma elevada produção de Acácia-Negra (*Acacia mearnsii De Wild*), uma espécie de leguminosa não nativa do Brasil. O cultivo desta leguminosa está relacionado à extração da madeira e do tanino presente na casca de sua árvore. O processo de extração do tanino acarreta na geração dos Resíduos de casca de Acácia Negra (RCAN) os quais acabam destinados à compostagem orgânica ou disposição em aterros, o que gera elevados custos às empresas produtoras. No ano de 2012, foram produzidas cerca de 103 mil toneladas de casca de acácia negra no estado, totalizando 100% da produção nacional. A projeção para o ano de 2016 é uma produção de mais de 150 mil toneladas do resíduo (IBGE, 2015).

Nesse contexto, observa-se que pesquisas recentes mostram a utilização e o aproveitamento energético dos resíduos de biomassa em reatores de leito fluidizado, contudo não se observa estudos sobre a utilização dos Resíduos de Cascas de Acácia Negra (RCAN) para essa finalidade. Dessa forma, na busca de alternativas energéticas e aliada a sua disponibilidade, os RCAN serão utilizados como insumo no presente estudo, uma vez que, o uso desta biomassa pode ajudar na geração de energia e torná-la de maior importância, tendo em vista que se trata de uma fonte renovável, além de proporcionar diminuição de custos às empresas geradora para sua destinação.



## 2. OBJETIVO

Considerando a elevada geração de resíduos de biomassa no estado do Rio Grande do Sul, especialmente o RCAN, bem como a elevada disponibilidade de carvão mineral, este trabalho tem como objetivo estudar variações no processo fluidodinâmico entre diferentes composições de biomassa, carvão e inertes em leito fluidizado de bancada ainda, a co-combustão destes materiais em sistema planta piloto com reator de leito fluidizado borbulhante, afim da avaliação das emissões dos gases gerados e análise dos parâmetros operacionais.

## 3. METODOLOGIA

### 3.1 Caracterização

O Resíduo de casca de acácia negra (RCAN) utilizado na pesquisa é proveniente de indústria da extração de tanino, sediada no Vale do Rio dos Sinos no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. O carvão mineral provém da jazida de Candiota também localizada no estado do Rio Grande do Sul. Para caracterização dos combustíveis, utilizou-se das técnicas de análise imediata, análise elementar e bomba calorimétrica (determinação do poder calorífico inferior). Os resultados das análises e as normas utilizadas estão listadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Análise imediata, análise elementar, poder calorífico inferior (PCI) e normas experimentais aplicadas ao resíduo de casca de acácia negra (RCAN) e carvão Candiota utilizados no trabalho

Combustível	RCAN	Carvão Candiota	Normas
Análise Imediata (% mássica, como recebido)			
C <sub>fixo</sub>	20,1	22,0	ASTM D 7582/2010
Cinza	3,8	55,0	ASTM D 7582/2010
Matéria Volátil	76,2	23,1	ASTM D 7582/2010
Umidade Total	57,6	17,1	ASTM D 7582/2010
Análise Elementar (%mássica base seca)			
C	52,7	33,8	ASTM D 5373/2008
H	5,3	2,3	ASTM D 5373/2008
S	0,1	1,9	ASTM S 4239/2011
N	1,4	0,6	ASTM D 5373/2008
O	40,5	6,4	ASTM D 5373/2008
Poder Calorífico (kcal/kg)			
PCI <sup>a</sup>	1868	2417	ABNT-NBR 8633/84
PCI <sup>b</sup>	4405	2915	ABNT-NBR 8633/84

<sup>a</sup> base seca, <sup>b</sup> base úmida.

### 3.2 Análise termogravimétrica

Para analisar as características da degradação térmica das amostras de RCAN e carvão Candiota foram obtidas as curvas termogravimétricas (TGA) através de equipamento termobalança LECO (ASTM D 7582/2010).

### 3.3 Caracterização física dos materiais

O diâmetro médio de Sauter ( $D_v$ ) do carvão mineral e da areia do leito foi determinado por peneiramento utilizando sistema de peneiras da série de Tyler. As massas específicas reais ( $\rho$ ) e as massas específicas aparentes ( $\rho_{apr}$ ) foram calculadas através de técnica de picnometria. Os valores dos parâmetros físicos são apresentados na Tabela 2.

A distribuição granulométrica não foi aplicada à amostra de biomassa, devido as grandes diferenças nos tamanhos das partículas e irregularidade dos formatos. A opção deste trabalho foi utilização do resíduo de biomassa como ele é disposto pela indústria, não sendo aplicado nenhum pré-tratamento de grande impacto como a moagem ou algum dimensionamento das partículas. A



Figura 1 apresenta a imagem do material RCAN utilizado, o mesmo apresenta partículas que variam de aproximadamente 1 a 5 mm de espessura e 5 a 10 mm de largura.

**Tabela 2.** Características físicas dos materiais

Característica	Casca de Acácia	Carvão Candiota	Areia do Leito
$D_s$ (mm)	-	0,35	0,37
$\rho_r$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,47	1,66	2,55
$\rho_{apr}$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,42	1,37	2,46

**Figura 1.** Resíduo de casca de Acácia Negra (RCAN)

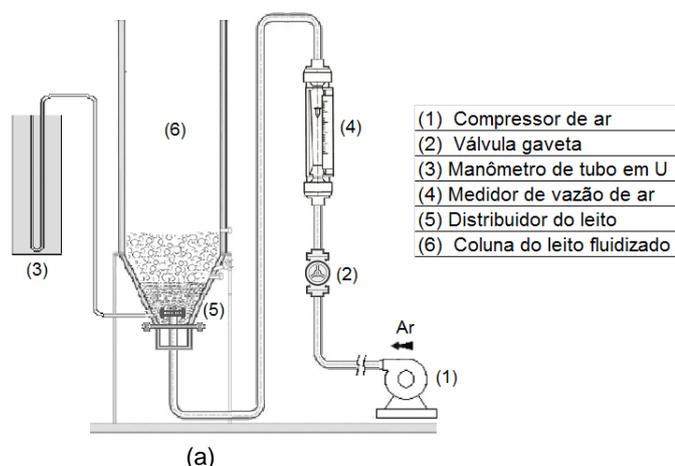


Resíduo de biomassa RCAN após a extração do tanino.

### 3.4 Sistema de fluidização em escala de bancada

O sistema de fluidização de bancada (Figura 2) é composto pelo compressor de ar (1), válvula reguladora de fluxo (2), manômetro de tubo em U (3), medidor de vazão de ar (4) e distribuidor de ar no leito (5). A coluna de leito fluidizado (6) é feita de acrílico transparente, para observar a fluidificação das partículas e foi constituída em formato de trapézio com área da base de 0,20 m<sup>2</sup>, área superior de 0,42 m<sup>2</sup> e 1,36 m de altura, seguindo o mesmo padrão do reator de leito fluidizado da planta piloto. O distribuidor do leito contém um conjunto de 7 injetores de ar conectados a tubulação localizado na base do fluidizador. O compressor garante o fornecimento de ar seco e válvula gaveta o ajuste do fluxo de ar para a fluidização dos materiais. A Figura 2a descreve o sistema do leito de bancada e a Figura 2b apresenta a imagem do fluidizador.

**Figura 2.** Sistema de fluidização (a) e imagem do fluidizador (b) em escala de bancada



(a) representação do equipamento de fluidização de bancada e seus principais componentes;  
(b) imagem da coluna de acrílico do fluidizador de bancada com o distribuidor interno de ar no leito.

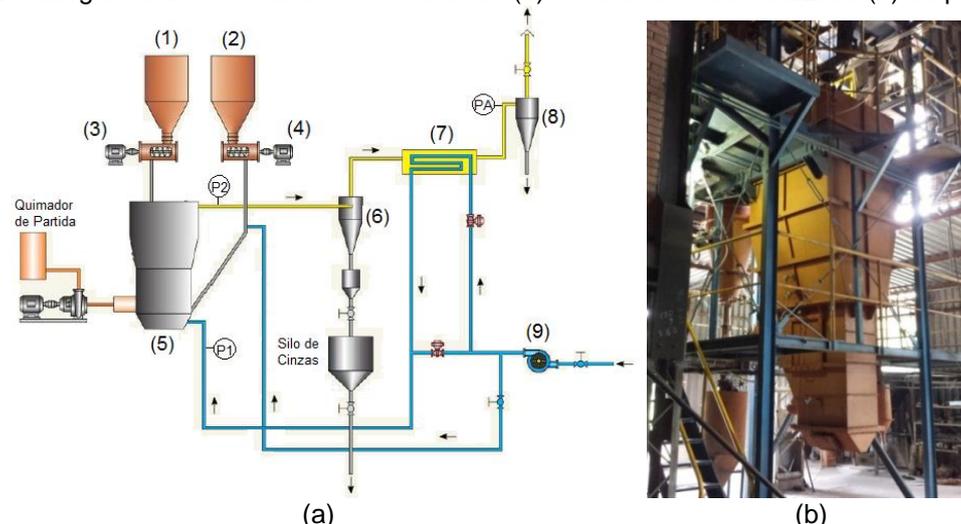
### 3.5 Processo de co-combustão em planta piloto

A Figura 3a apresenta um fluxograma com os principais equipamentos da planta piloto de 0,25 MWt utilizada para a realização dos testes de co-combustão. Durante as operações os combustíveis armazenados nos silos de carvão (1) e biomassa (2) são conduzidos com taxas controladas através de transportador tipo roscas sem fim (3 e 4) para a fornalha de leito fluidizado (5), onde ocorre a combustão. Os gases gerados sobem ao longo do reator e passam através do ciclone de material refratário (6) para separação das cinzas volantes. Na sequência os gases seguem pelo trocador de calor (7), que aproveita o calor dos gases gerados e pré-aquece o ar de



entrada no leito fluidizado, por fim, os gases da combustão passam através de um novo ciclone (8) e só então são liberados pela chaminé. O ar que alimenta o sistema é proporcionado através de um ventilador de tiragem forçada (9). Os pontos de medida de pressão do reator estão representados na figura pelos pontos P1 e P2. O ponto de amostragem (PA) dos gases da combustão está localizado após o trocador de calor (7) e é interligado a um analisador de gases HORIBA CMA-680. A Figura 3b mostra a imagem do reator da planta piloto composta de câmara de combustão de aço carbono revestida internamente com material refratário.

**Figura 3.** Fluxograma do sistema de co-combustão (a) e reator de leito fluidizado (b) da planta piloto



(a) fluxograma da planta piloto de co-combustão;  
(b) imagem do reator de leito fluidizado da planta piloto.

As condições experimentais do presente trabalho se valerem das variações das proporções de alimentação entre a biomassa RCAN e o carvão Candiota de acordo com o desempenho do reator. Dessa forma, os testes foram realizados com alimentação contínua no reator decomposições próximas a 40%, 60% e 70% em massa de biomassa em relação ao carvão. Para fins de comparação foram realizadas operações com condições de queima utilizando apenas o carvão Candiota. As condições operacionais realizadas nos testes em planta piloto assim como os dados das análises dos gases de combustão são registradas após a estabilização do leito na temperatura de operação do reator a 850°C e serão especificadas no item 4.3.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização dos combustíveis

A análise imediata (Tabela 1) apresentou valores do teor de carbono fixo semelhantes para ambos os combustíveis. O composto RCAN apresentou o maior teor de material volátil e umidade em relação ao carvão Candiota. Os elevados teores de cinzas observados no carvão superam os 50% em massa, enquanto o valor para a biomassa não ultrapassa 4%. Os resultados da análise elementar (Tabela 1) apontaram a biomassa RCAN com níveis de carbono elementar acima de 50% (em massa), sugerindo que estes resíduos possam ser bem aproveitados para a geração de energia térmica.

Com relação ao elemento enxofre, o RCAN apresentou teor de apenas 0,1% do elemento, bem abaixo dos 1,9% apresentados no carvão mineral. Como esperado, o teor de enxofre na biomassa é inferior a 0,2%. Os resultados para a análise imediata e elementar obtidos neste trabalho mostraram concordância com as informações apresentadas por Gomes, (2013) e Brachi 2014 e indicando que estes materiais devem ser tratados com atenção, devido a emissão de gás poluente

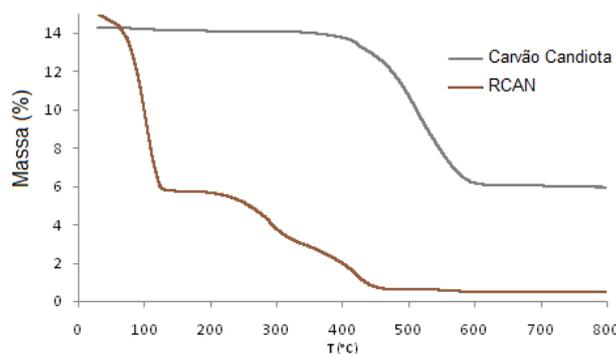


(SO<sub>x</sub>) emitidos à atmosfera e ainda com relação a problemas de corrosão do equipamento (BRAGANÇA, 1996, BADR, 1994).

A Figura 4 apresenta as curvas de análise térmica TGA para as amostras do Carvão Candiota e biomassa RCAN. A decomposição térmica para ambos os compostos prossegue dentro de três regiões, onde se observa duas perdas de massa bem definidas e uma mais discreta.

Através da curva TGA para biomassa RCAN observa-se uma elevada perda de massa com o aumento da temperatura até 110°C, que corresponde ao alto teor de umidade e a consequente evaporação desta massa do composto. Uma segunda região de perda de massa pode ser identificada entre 200°C a 450°C, a qual está relacionada ao conteúdo de celulose e hemicelulose presente na biomassa e a terceira perda de massa bem mais discreta, a partir dos 450°C, esta relacionada à degradação da lignina também presente na mesma. (EDREIS, 2013, PÉCORA et al., 2014). Quanto ao comportamento térmico do carvão Candiota, a curva TGA mostra uma grande perda de massa entre 350°C e até próximo aos 600°C. Esta perda de massa é referente à degradação dos grupos carboxílico presentes no carvão que são menos estáveis e iniciam sua decomposição acima dos 400°C (REICHEL et al., 2013).

**Figura 4.** Análise termogravimétrica (TGA) do RCAN e Carvão Candiota.



## 4.2 Velocidade mínima de fluidização “U<sub>mf</sub>” das misturas

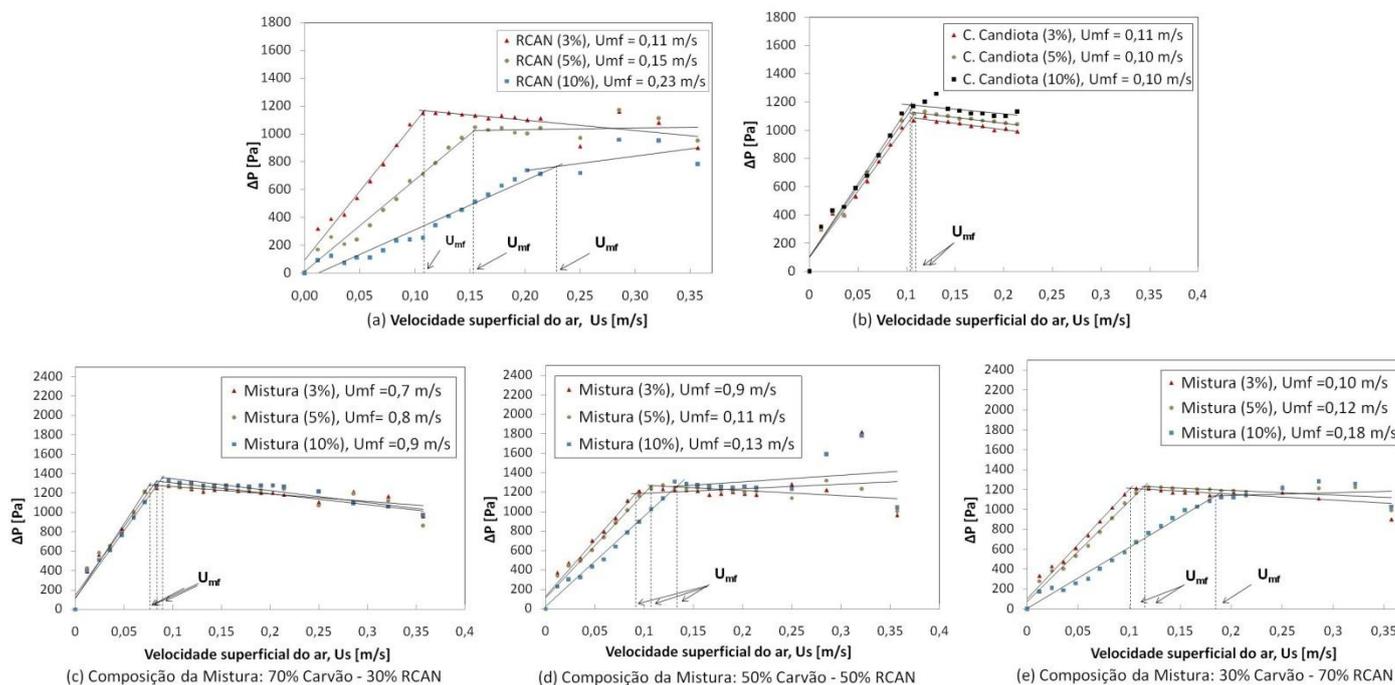
As Figuras 5a-5e apresentam a queda de pressão medida em função da velocidade superficial do gás para as diferentes concentrações do RCAN e carvão Candiota em leito fluidizado de areia.

Foram realizados 3 testes com as misturas binárias RCAN/Areia nas composições de 3%, 5% e 10% em massa do RCAN (Figura 5a). Similarmente foram realizados 3 testes para a mistura Carvão/Areia nas composições de 3%, 5% e 10% em massa do carvão, Figura 5b. Para ampliar os testes de fluidização foram preparadas amostras com misturas dos materiais RCAN e carvão nas proporções em massa de 70% carvão - 30% biomassa, 50% carvão - 50% biomassa e 30% carvão - 70% biomassa. Cada mistura dos materiais mencionada foi aplicada junto ao leito de areia obedecendo as proporções: 3%, 5% e 10% em relação a massa total do leito de areia. As Figuras 5c, 5d e 5e, representam a queda de pressão medida em função da U<sub>s</sub> do ar destas composições. A altura do leito foi mantida em 9 cm para todos os testes.

Através dos testes, pode ser visto que as curvas de queda de pressão nas Figuras 5a-5e têm um padrão similar. Em um primeiro estágio, quando a velocidade superficial do gás é baixa, a queda de pressão total ( $\Delta P$ ) aumenta com o aumento da velocidade do gás e as partículas permanecem estagnadas (caracterizando leito fixo). Com o aumento da velocidade superficial, a queda de pressão torna-se igual ao peso dos sólidos do leito, e seguindo o aumento de velocidade do ar o leito é totalmente fluidizado. O método gráfico (KUNNI & LEVENSPIEL, 2001) é aplicado para a determinação da velocidade mínima fluidização “U<sub>mf</sub>” de cada teste e seus valores podem se observados nas Figuras 5a-5e.



Figura 5. Queda de pressão ( $\Delta P$ ) em função da velocidade superficial do ar ( $U_s$ ).



Entre os testes das misturas de Carvão/Areia (Figura 5b) foram observadas pequenas diferenças nas velocidades mínimas de fluidização,  $U_{mf}$ . Por outro lado, a fluidização da mistura RCAN/Areia (Figura 5a), apresentou valores de  $U_{mf}$  que variaram de 0,11 a 0,23 m/s. Ao mesmo tempo, a queda de pressão  $\Delta P$  diminuiu com o aumento da concentração de biomassa no leito. O mesmo comportamento com relação ao aumento da  $U_{mf}$  e diminuição do  $\Delta P$  foram observados na mistura ternária 30% carvão - 70% RCAN (Figura 5e), porem as velocidades e a queda de pressão variaram com menor intensidade. Os resultados experimentais para  $U_{mf}$  nas demais misturas ternárias (Figura 5c e 5d) foram mais próximos ao comportamento da composição binária Carvão/Areia para as composições aplicadas no leito.

### 4.3 Co-combustão e estudo dos parâmetros de operação

A Tabela 3 apresenta as condições operacionais realizadas nos testes em planta piloto de co-combustão. As operações 01 e 02 correspondem aos testes realizados unicamente com carvão mineral na alimentação do reator. As operações 03 a 07 apresentam testes de co-combustão do RCAN em proporções que chegaram a 38% (operação 03) até 73% (operação 07) em massa da biomassa junto ao carvão Candiota alimentado no reator.

As vazões mássicas do carvão, do RCAN e ar atmosférico da alimentação para as operações estão representadas por  $m^0_{Carvão}$ ,  $m^0_{RCAN}$  e  $m^0_{ar}$ , respectivamente. O parâmetro  $m^0_{ar,esteq}$  refere-se à massa de ar estequiométrica, calculada a partir das reações estequiométricas de combustão (JENKINS et al, 1998). A porcentagem de excesso de ar no reator foi calculada a partir da diferença das massas de ar estequiométrico e das vazões mássicas de ar insuflado no reator,  $m^0_{ar}$ . O parâmetro  $\Delta P_{leito}$  refere-se à diferença de pressão antes e depois do leito fluidizado. Os parâmetros  $T_{04}$  e  $T_{05}$  representam as temperaturas na entrada e a temperatura logo acima do leito. As operações 01 e 02 utilizado carvão Candiota não apresentaram variações significativas nos parâmetros de operação em planta piloto. A alimentação do carvão se manteve a mesma nas duas operações (27,3 kg/h) e os parâmetros de operação praticamente se repetiram para a estabilização da temperatura do leito fluidizado a 850°C, a exceção da queda de pressão do leito  $\Delta P_{leito}$ . Com relação às operações de co-combustão (operações 03 a 07), para que estas



atingissem a temperatura de operação do leito (próximo a os 850°C) foram necessárias menores porcentagens de excesso de ar no reator em comparação com a queima unicamente do carvão, em particular, na condição 07 pode se observar a menor porcentagem de excesso de ar (50,8°C) para a estabilização da temperatura do leito. Estas necessidades de ajuste do processo vêm a ser consequência da elevada quantidade de biomassa na correte de alimentação, que em comparação com o carvão, possui menor poder calorífico e maior umidade (Tabela 1), além do maior conteúdo de material volátil que tende a queimar o material antes de chegar ao leito. (Gomes, 2013).

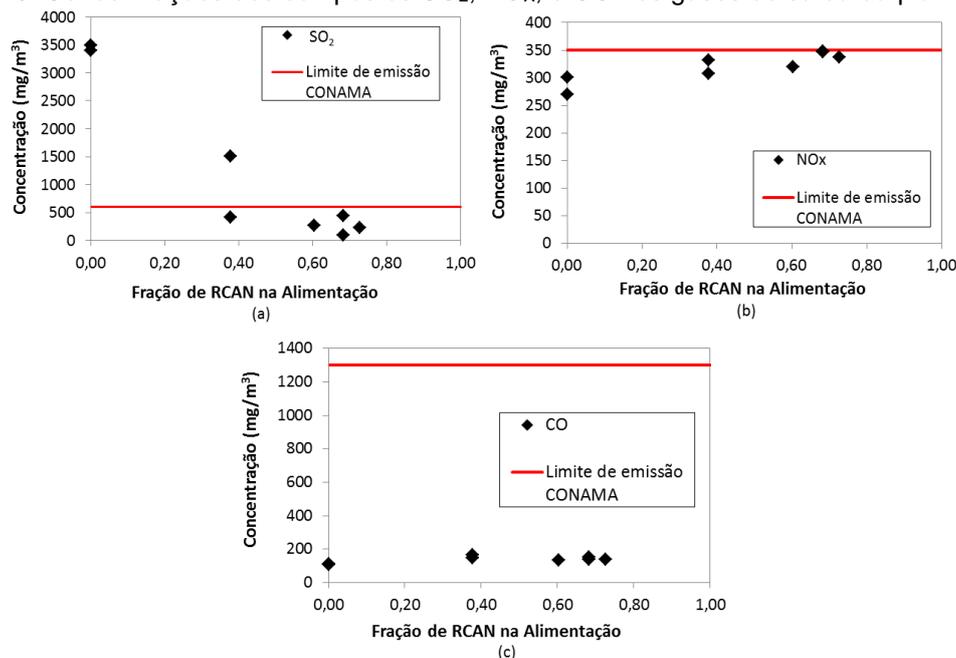
**Tabela 3.** Condições operacionais das operações em planta piloto de combustão

Operações	01	02	03	04	05	06	07
% Carvão/RCAN	100/0	100/0	62/38	62/38	40/60	32/68	27/73
m <sup>0</sup> <sub>Carvão</sub> (Kg/h)	27,30	27,30	15,85	10,85	10,65	7,50	8,57
m <sup>0</sup> <sub>RCAN</sub> (Kg/h)	0	0	9,62	9,6	16,21	16,21	22,81
m <sup>0</sup> <sub>ar</sub> (Kg/h)	192,7	191,9	197,6	171,7	199,0	172,9	195,6
m <sup>0</sup> <sub>ar</sub> esteq (Kg <sub>ar</sub> /Kg <sub>comb</sub> )	101,2	101,3	100,1	100,1	109,1	97,5	129,7
Excesso de Ar (%)	90,3	89,5	97,3	71,5	82,4	77,3	50,8
ΔP <sub>leito</sub> (mmCA)	605	634	765	869	888	764	893
T <sub>04</sub> (°C)	852	847	857	857	850	857	853
T <sub>05</sub> (°C)	855	850	865	863	856	862	859

## 4.4 Emissões de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, e CO

Entre as espécies consideradas poluentes (espécies que apresentam um comprovado efeito adverso para o ambiente e que por isso existe uma legislação que limita as suas emissões), encontram-se o SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, e CO. A Figura 6a-6c apresentam as concentrações dos compostos nos gases de combustão na saída do sistema planta piloto em função das frações de RCAN aplicada as operações. Os limites de detecção dos compostos também foram expressos nos gráficos com base na resolução CONAMA (2016) para instalações termelétricas.

**Figura 6.** Concentrações dos compostos SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, e CO nos gases de saída da planta piloto





Na Figura 6a, percebe-se claramente um decréscimo significativo na concentração de  $\text{SO}_2$  a partir da adição de biomassa RCAN na alimentação no reator. Apenas as operações com carvão e uma operação utilizando 38% biomassa apresentaram concentrações de  $\text{SO}_2$  acima dos limites de detecção do CONAMA ( $600 \text{ mg/m}^3$ ), as operações com composições acima de 60% de RCAN apresentaram concentrações abaixo deste limite de emissão.

Pode-se observar concentrações consideráveis de  $\text{NO}_x$  nos gases de combustão (Figura 6b) para as operações na planta piloto, este fato está associado a teores de nitrogênio elementar detectados nas amostras dos combustíveis (Tabela 1).

Concentrações de monóxido de carbono (CO) detectadas nos gases de saída do reator (Figura 6c) não apresentaram variações consideráveis durante o processo de co-combustão. Contudo, estas concentrações indicam uma combustão incompleta do carbono constituinte nos combustíveis (IDEIAS, 2008, SELEMA, 2008).

## 5. CONCLUSÃO

Consideram-se importantes os resultados obtidos na caracterização do RCAN, uma vez que o teor de carbono elementar deste resíduo se apresentou elevado, da mesma forma que os níveis de material volátil (acima de 50% em massa), sugerindo que este tipo de biomassa possa ser bem aproveitado para a geração de energia térmica. Vale mencionar, o comportamento de maior temperatura de ignição do RCAN comparado ao carvão Candiota, com perdas de massa intensas entre temperaturas de  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  demonstrados através das análises de TGA.

Os resultados de fluidização no sistema de bancada mostram que a adição de pequenas quantidades de biomassa tem influência sobre a fluidodinâmica do leito, e ainda, que velocidades mínimas de fluidização das misturas apresentaram um acréscimo com o aumento da fração de biomassa no fluidizador.

O sistema de leito fluidizado em planta piloto foi testado com sucesso para a co-combustão do carvão Candiota com diferentes frações de massa do RCAN na forma "como recebida". Com base nos resultados, pode-se concluir que se atingiram desempenhos similares de temperatura no reator utilizando quantidades acima de 38% de biomassa na composição de alimentação do reator operando com valores menores de excesso de ar comparados com a utilização do carvão. Ainda, a co-combustão do RCAN mostrou favorecer consideravelmente, a diminuição das concentrações do composto  $\text{SO}_2$  nos gases gerados no processo.

## REFERÊNCIAS

ABELHA P., Emissões gasosas durante a co-combustão de resíduos com carvão. Lisboa, 253 p., 2005. Dissertação de Mestrado - Universidade Nova de Lisboa.

BADR, M.E.; PROPERT, S.D. Atmospheric sulphur: trends, sources, sink and environmental impacts. Applied Energy, v. 47, p. 1-67, 1994.

BRACHI, P. et al. Fluidized bed co-gasification of biomass and polymeric wastes for a flexible end-use of the syngas: Focus on bio-methanol. Fuel, v. 128, p. 88-98, 2014.

BRAGANÇA, S. R. Dessulfuração do gás de combustão do Carvão Candiota em Leito Fluidizado: Influência da Razão Molar Ca/S, Granulometria e Composição Química do Sorbente. Porto Alegre, 121 p., 1996. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n. 436, de 22 de dezembro de 2011. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anterior a 02 de janeiro de 2007.



EDREIS, E. M. A et al. CO<sub>2</sub> co-gasification of lower sulphur petroleum coke and sugar cane bagasse via TG-FTIR analysis technique. *Bioresource Technology*, v. 136, p. 595–603, 2013.

FAÉ GOMES, G. M. et al. 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.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Produção da Silvicultura - 2011*. Disponível <<http://www.ibge.gov.br/>> (acessado em Janeiro de 2016).

IDEIAS, C. M. C. *Influência da matéria volátil na Combustão de biomassa em leito fluidizado*. Aveiro, 128 p., 2009. Dissertação Mestrado em Engenharia do Ambiente, Universidade de Aveiro.

JENKINS, B.M., BAXTER, L.L., MILES JR., T.R., “Combustion of biomass”, *Fuel Processing Technology*, Vol. 54, p. 17, 1998.

KHAN, A.A., DE JONG, W., JANSSENS, P.J., SPLIETHOFF, H., *Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies*. *Fuel Process Technol*, V. 90, p. 21–50. 2009.

KUNNI Kunii, D., LEVENSPIEL, O., *Fluidization Engineering*, (2nd edition), Butterworth Heinemann Series in Chemical Engineering, Howard Brenner (Ed.), Massachusetts Institute of technology, USA, 1991.

MADHIYANON, T. SATHITRUANGSAK P. SOPONRONNARIT S., 2009 Co-combustion of rice husk with coal in a cyclonic fluidized bed combustor. *Fuel* 88: 132–138.

PÉCORA, A. A. B. et al. 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.

REICHEL, D. et al. Effect of ash components on devolatilization behavior of coal in comparison with biomass - Product yields, composition, and heating values. *Fuel*, v. 114, p. 64–70, 2013.

SATHITRUANGSAK, P. MADHIYANON, T. SOPONRONNARIT, S., Rice husk co-firing with coal in a short combustion chamber fluidized bed combustor (SFBC). *Fuel* 88: 1394–1402, 2009.

SELEMA. D, *Co-Combustão de Biomassa e Carvão em Leito Fluidizado: Impactes nas emissões atmosféricas de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, Dioxinas e Furanos e Material Particulado*. Lisboa, 140 p., 2008. Dissertação de Mestrado - Universidade Nova de Lisboa.

VASSILEV, V., BAXTER, D., ANDERSEN, L., VASSILEVA, C., An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, V. 89, p. 913-933. 2010.