

AValiação DA VELOCIDADE DE PARTÍCULAS SOB DIFERENTES CONFIGURAÇÕES EM SIMULADOR DE PCI*

Flávio Filipe Soares Viegas¹

Guilherme Tonatto Kienetz²

Hector Alejandro Picarte Fragoso³

Gabriel Penna Kramer Lima⁴

Antônio Cezar Farias Vilela⁵

Eduardo Osório⁶

Resumo

A flexibilização de materiais carbonosos que se pode utilizar na injeção de carvão pulverizado (*Pulverized Coal Injection - PCI*) e sua redução de custos operacionais faz com que essa tecnologia seja amplamente utilizada e estudada para entender como materiais de diferentes características se comportam na zona de injeção dentro do alto-forno. A fim de compreender melhor o comportamento das partículas em simulador de PCI, neste trabalho foi utilizado o simulador do LaSid para avaliar o impacto da granulometria, diferença de pressão e tempo de abertura de válvula sob a velocidade das partículas. Tempos curtos de abertura de válvula (50 - 75 ms) e pequena diferença de pressão (2,1 - 3,1 bar) não surtiram efeito significativo na velocidade das partículas. Em maiores tempos de abertura de válvula (150 - 300 ms) e diferença de pressão (0,1 - 6,1 bar) as partículas assumiram velocidade satisfatória, visto que há maior fluxo de gás e força motriz suficiente para gerar arraste das partículas no simulador. As faixas granulométricas provocaram diferença apenas nas configurações mais extremas de simulação, sendo as menores granulometrias (1 - 1,4 mm e 1,4 - 2 mm) mais eficazes.

Palavras-chave: Injeção de Carvão Pulverizado; Simulador de PCI; Velocimetria; Alto-forno.

EVALUATION OF PARTICLE VELOCITY UNDER DIFFERENT CONFIGURATIONS IN PCI SIMULATOR

Abstract

The flexibilization of carbonaceous materials that can be used in the pulverized coal injection (PCI) and its reduction in operational costs have made this technology widely used and studied to understand how materials with different characteristics behave in the injection zone inside the blast furnace. In order to better understand the behavior of particles in an PCI simulator, this study used the LaSid simulator to evaluate the impact of particle size, pressure difference, and valve opening time on particle velocity. Short valve opening times (50 - 75 ms) and small pressure differences (2.1 - 3.1 bar) did not significantly affect particle velocity. However, with longer valve opening times (150-300 ms) and larger pressure differences (0.1 - 6.1 bar), the particles achieved satisfactory velocity, due to the greater gas flow and sufficient driving force to generate particle drag in the simulator. The particle size ranges only showed a difference in the most extreme simulation settings, with smaller particle sizes (1 - 1.4 mm and 1.4 - 2 mm) being more effective.

Keywords: Pulverized Coal Injection; PCI rig; Blast furnace; Velocimetry.

¹ Engenharia Metalúrgica, graduação, bolsista, Laboratório de Siderurgia (LaSid), DEMET, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

² Engenharia Metalúrgica, graduação, bolsista, Laboratório de Siderurgia (LaSid), DEMET, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

³ Mestre, Laboratório de Siderurgia (LaSid) da PPGE3M/DEMET/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil

- ⁴ *Mestre, Laboratório de Siderurgia (LaSid) da PPGE3M/DEMET/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil*
- ⁵ *Professor Dr., Laboratório de Siderurgia (LaSid) da PPGE3M/DEMET/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.*
- ⁶ *Professor Dr., Laboratório de Siderurgia (LaSid) da PPGE3M/DEMET/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

O PCI (*pulverized coal injection*) é uma técnica amplamente utilizada em altos-fornos desde a década de 1980 e tem como principal objetivo reduzir o consumo de coque no alto-forno e, como consequência, reduzir também as emissões de CO₂. A principal vantagem dessa tecnologia é promover a flexibilidade no uso de materiais carbonosos alternativos para injeção, permitindo uma redução dos custos operacionais e a adoção da ampliação da redução das emissões do processo. A zona das ventaneiras possui um ambiente bastante severo, durante a injeção de carvão pulverizado, nessa zona pode-se atingir altas pressões de 5 bar, temperaturas de 1250 - 2200°C em curto tempo de residência 10 - 40ms [1]. Devido a essas características, a instrumentação dessa região para estudo de diferentes materiais na injeção é bastante complexo.

Desta forma, assim como outras instituições ao redor do mundo, o Laboratório de Siderurgia da UFRGS (LaSid) desenvolveu um equipamento capaz de simular em escala laboratorial as condições encontradas na zona de injeção dos altos-fornos. Este simulador é qualificado para operar sob elevada pressão, altas taxas de aquecimento e promovendo o fluxo de partículas no reator. Diversos trabalhos foram realizados no LaSid para desenvolver o funcionamento do simulador de PCI [2][3][4].

Uma vez que o processo de formação do ferro-gusa através do alto-forno ocorre de forma contínua é esperado que a injeção de PCI se estabeleça a uma taxa constante. Logo, existem técnicas conhecidas no meio científico para estudar a velocidade do fluxo de fluidos e partículas em laboratório. Como o PTV (Particle Tracking Velocity), que determina a velocidade a partir do monitoramento de partículas em três dimensões, o LDV (Laser Doppler Velocimetry), que usa um aparato como laser para medir velocidades, e o PIV (Particle Image Velocity) [5], que é uma técnica comumente utilizada para medir a velocidade de partículas que passam por um determinado espaço, sendo de grande uso devido as diversas formas que se pode montar o setup, posição de câmera, iluminação, software/algoritmo para visualizar as partículas durante o experimento. Portanto, visando melhorar as condições de operação no simulador de PCI, o presente trabalho objetiva avaliar o tempo de residência de partículas e suas velocidades na área termicamente afetada do equipamento sob o efeito de fatores relacionados às configurações do simulador, como tempo de abertura de válvula e diferença de pressão bem como a granulometria da partícula injetada, a partir de uma série de testes experimentais no simulador utilizando a técnica PIV para visualização das partículas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização do Carvão

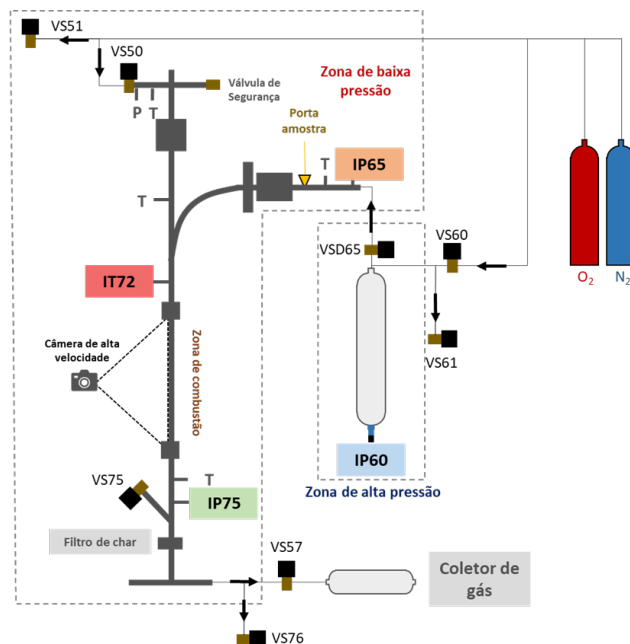
Foi avaliado um carvão mineral de baixo volátil sob faixa granulométrica de 2,36 a 2 mm, 2 -1,4 mm e 1,4 a 1 mm tipicamente empregado para injeção de altos-fornos. A análise química do material foi realizada sob norma ASTM 7582-15 no analisador termogravimétrico LECO TGA 701 no Laboratório de Siderurgia da UFRGS.

2.2 Simulador Físico da Zona de Combustão

O simulador físico da zona de combustão, desenvolvido no LaSid, é um reator automatizado que opera por batelada e é dividido em duas zonas, a zona de alta pressão (ZAP) e a zona de baixa pressão (ZBP).

A amostra é acondicionada no porta amostra localizado na ZBP, e, em seguida, as duas zonas são pressurizadas independentemente até 3,1 bar. Após a pressurização, a válvula VS76, que separa as duas zonas, é aberta de modo que a pressão na ZBP caia até a pressão de teste definida pelo operador. Ao atingir a pressão experimental na ZBP, a válvula VS76 é fechada e a válvula VSD65 é aberta por um determinado tempo para que a amostra seja arrastada até o coletor.

Figura 1. Estrutura do Simulador de PCI do Laboratório de Siderurgia da UFRGS (LaSid)



2.3 Configuração do Simulador

O painel de controle da rotina das válvulas durante o ensaio está ilustrado na Figura 2. Nos experimentos deste trabalho, apenas os parâmetros *SP Pressão IP75 – SHOOT*, *SP Pressão Aquisição Rápida*, *Tempo 04 – SHOOT* e *IP60 - PA* variaram entre os experimentos, os demais permaneceram constantes.

Figura 2. Painel de controle do simulador

Limpeza do Simulador :	Ensaio de Pirólise/Combustão :	Ensaio One Shoot :
SP CFM21 (O2) - Pulso : 25,0 LPM	SP CFM20 (N2) - Purga : 25,0 LPM	Tempo01 - SHOOT : 0,2 s
SP IP60 - Pressurização - Pulso : 2,00 bar	SP CFM21 (O2) - Purga : 25,0 LPM	Tempo02 - SHOOT : 30000 ms
Tempo de Despressurização Pulso : 1 s	SP IP80 Pressurização - Purga : 0,50 bar	SP Pressão IP75 - SHOOT : SP_IP75
Número de Repetições Pulso : 1	SP IP80 Despressurização - Purga : 0,10 bar	SP Pressão Aquisição Rápida : SP_aq_rap
SP IP75 - Queda de pressão - PB - PC : 1,90 bar	SP IP80 Vácuo 01 - Vácuo : -0,90 bar	Tempo03 - SHOOT : 0 ms
SP CFM21 (O2) - Limpeza VE : 25,0 LPM	Número de Purgas : 3	Tempo04 - SHOOT : t4
Tempo 01 - Limpeza VE : 5 s	SP IP65 Vácuo 02 - Vácuo : 0,20 bar	Tempo05 - SHOOT : 2000 ms
SP IP65 - Pressurização - PB : 0,50 bar	SP IP80 Vácuo 03 - Vácuo : 0,00 bar	SP CFM20 (N2) - Char : 15,00 LPM
SP CFM21 (O2) - Limpeza PB : 25,0 LPM	SP CFM20 (N2) - PA : 25,0 LPM	Tempo01 - Char : 2200 ms
Tempo 01 - Limpeza PB : 1 s	SP CFM21 (O2) - PA : 25,0 LPM	Tempo02 - Char : 10 s
Tempo 02 - Limpeza PB : 1 s	SP IP60 - PA : 3,10 bar	SP IP 80 Pressurização - AG : 0,00 bar
Tempo03 - Limpeza PB : 1 s	SP CMF20 (N2) - PB (Lenta) : 20,0 LPM	SP IP 75 Despressurização - FCA : 0,30 bar
SP Despressurização IP75 - Char : 0,01 bar	SP CMF21 (O2) - PB (Lenta) : 20,0 LPM	
SP CFM21 - Limpeza Char : 25,0 LPM	SP IP65 - PB (Lenta) : 3,10 bar	
Tempo Purga - Char : 10 s	Rampa Vazão - PB (Lenta) : 60 s	

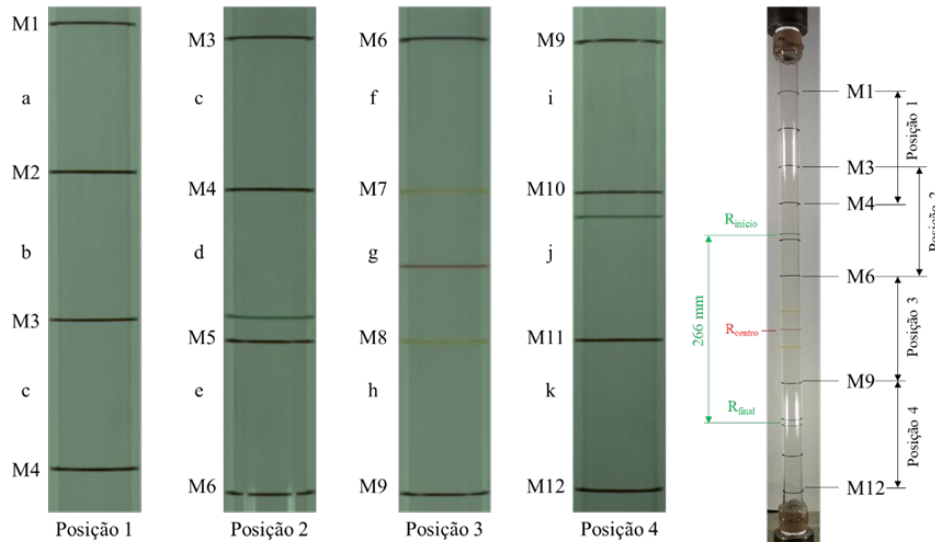
2.4 Aparato Experimental

Para realização do ensaio foi utilizado uma câmera de alta velocidade Fastec Imaging modelo IL3-100-L com resolução de 800 x 600 com capacidade de registrar imagens a 1250 quadros por segunda posicionada em frente ao tubo de acrílico e sua altura é regulada conforme a posição do tubo que se deseja filmar.

O tubo de acrílico possui 12 marcações equidistantes com espaçamento de 5 cm em cada uma, sendo 10 pretas e 2 amarelas, além de uma marcação vermelha. As marcações amarelas ficam a 2,5 cm da marcação de vermelha, que é a região central da resistência do forno de combustão, utilizada como referência para nossos experimentos. A marcação em verde indica a região das resistências de 266 mm.

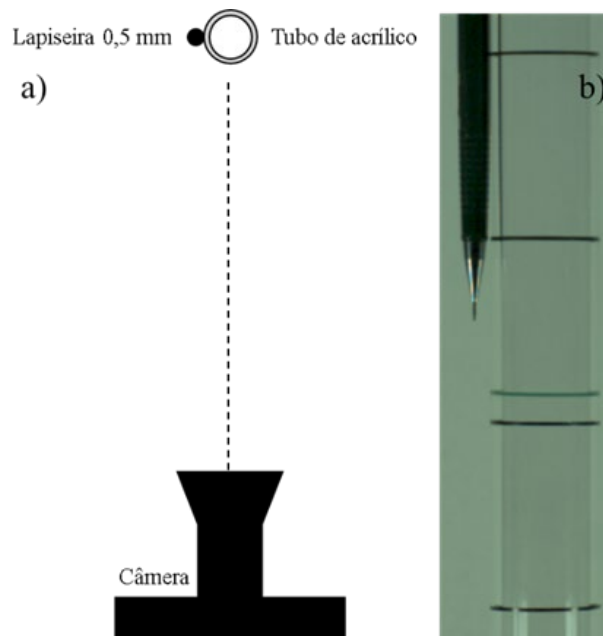
Em razão de limitações relacionadas a resolução das imagens na filmagem integral do tubo de acrílico, optou-se por dividir as seções de filmagens para 4 posições sendo cada posição correspondente a filmagem de 15 cm do tubo de acrílico. Cada posição é subdividida por 3 marcações principais sob uma distância de 5 cm entre si e em três seções, indicadas pelas letras do alfabeto (a - k).

Figura 3. Divisão do tubo de acrílico



Para o ajuste do foco da imagem, é posicionada uma lapiseira técnica com exposição do grafite de 0,5 mm, conforme o esquema da figura 4, e o foco é ajustado para que seja possível registrar o grafite com 0,5 mm de diâmetro situado na ponta da lapiseira. Essa espessura é 50 % inferior à do corte inferior da menor faixa granulométrica testada (1-1,4 mm).

Figura 4. Esquema de ajuste do foco



a) representa a disposição da câmera em relação ao tubo e b) a área para ajuste do foco

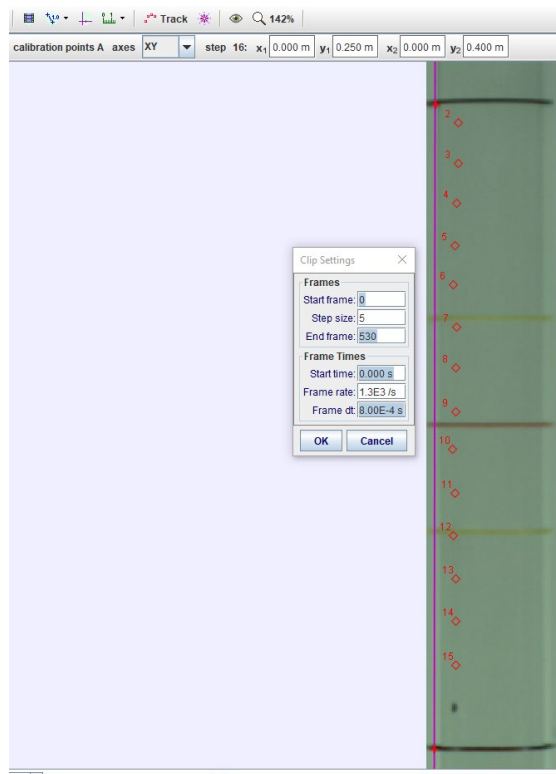
2.5 Planejamento dos ensaios

Os ensaios foram divididos a partir de dois fatores, a diferença de pressão entre a ZBP e ZAP e tempo de abertura de válvula. Para a primeira série de ensaios foi determinada a menor diferença de pressão e os menores tempos de abertura para a VSD65. Na segunda série avaliou-se a maior diferença de pressão admitida pelo simulador e maiores tempos para t4. Nos ensaios testando essas configurações foram utilizadas 5 partículas para as dadas faixas granulométricas adotadas para cada série de ensaios e em suas repetições.

2.6 Software para análise de imagem

Para análise da velocidade das partículas foi utilizado o *Tracker Video Analysis and Modeling Tool*. O software foi configurado para que os pontos de cada partícula registrados ao longo do tubo tivessem o intervalo de 5 frames com taxa de 8 ms por frame. Além disso, pontos de calibração foram utilizados para determinar o comprimento do eixo y presente na região 3, veja Figura 5, como sendo de 0,25 m a 0,40 m. Essa região foi escolhida para análise por referenciar onde estão localizadas as resistências do forno do Simulador de PCI.

Figura 5. Configurações do software



3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização do carvão

A Tabela 1 apresenta os resultados da análise imediata do carvão utilizado para os ensaios.

Tabela 1. Caracterização química (imediate) e física do carvão

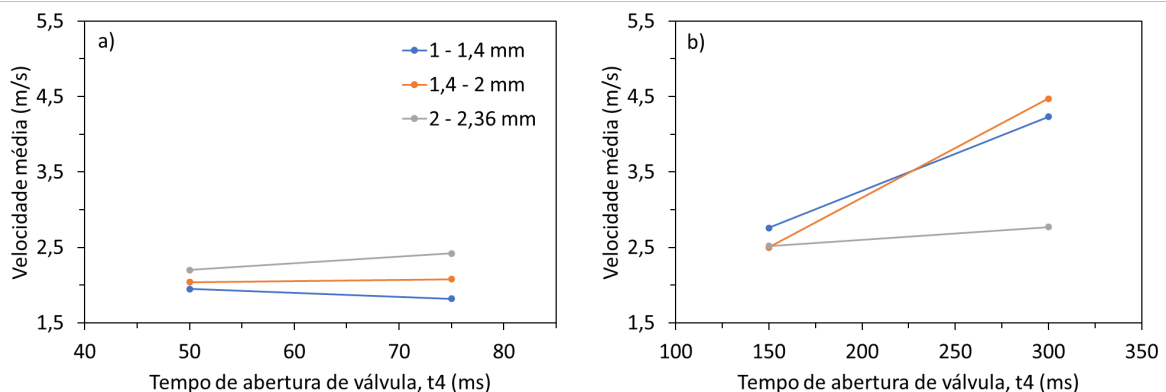
Material	U%	MV%	CZ%	CF%
BV	2,60	15,40	10,60	74,00

U% = Umidade; MV% = Matéria Volátil; CZ% = Cinzas; CF%= Carbono fixo

3.2 Testes no simulador de PCI

A Figura 6 apresenta a relação entre o tempo de abertura de válvula t_4 e a velocidade média das partículas para diferentes faixas granulométricas sob uma diferença de pressão de 1 bar e 6 bar.

Figura 6. Relação entre o tempo de abertura da válvula VSD65 (t_4) e a velocidade média das partículas para diferentes faixas granulométricas sob diferença de pressão de (a) 1 bar e (b) 6 bar.



A partir da Figura 6-a, é possível observar que os ensaios sob uma baixa diferença de pressão entre as zonas de alta (3,1 bar) e baixa (2,1 bar) pressão combinada com curtos tempos de abertura da válvula (t_4) não foi suficiente para impactar de forma significativa sobre a velocidade das partículas. Na comparação entre as diferentes faixas granulométricas, as partículas de maior faixa apresentaram uma velocidade média ligeiramente superior, seguida pela faixa intermediária e pela de menor faixa, de 1 a 1,4 mm, apresentando a menor velocidade.

A partir da Figura 6-b, é possível notar que os ensaios sob uma maior diferença de pressão, há indícios de que a ação combinada do aumento da pressão com maiores tempos de abertura de válvula (t_4) exercem uma influência positiva na velocidade das partículas nas duas menores faixas granulométricas testadas. As partículas de maior granulometria (2-2,36 mm) apresentaram uma velocidade média da ordem de 2,5 m/s, sendo esse um valor muito próximo ao observado nos testes sob uma diferença de pressão de 1 bar e tempos de válvula de 50 e 75 ms, sendo um indício de que nessa faixa granulométrica os parâmetros operacionais de diferença de pressão e tempo de abertura de válvula do simulador não afetam a velocidade da partícula. Por outro lado, a partir das partículas com granulometrias inferiores a 2 mm, a ampliação do pulso de gás a partir da ação conjugada da diferença de pressão com o aumento do tempo de abertura de válvula, promoveu a velocidades das partículas para aproximadamente 4,5 m/s.

Entretanto, não foi possível observar diferenças significativas entre as faixas com 1-1,4 mm e 1,4-2 mm, sendo necessário a condução de mais testes sob granulometrias mais baixas a fim de se construir um perfil de velocidade mais robusto para diferentes granulometrias e de avaliar o papel dos parâmetros operacionais do simulador sobre a velocidade das partículas, em especial, na faixa de granulométrica comumente utilizada para injeção no PCI.

4. CONCLUSÃO

A menor diferença de pressão entre ZBP e ZAP configurada junto aos curtos tempos de t_4 são limitantes para impactar a velocidade das partículas, uma vez que a força motriz não é suficientemente forte para fornecer arraste potente depois da abertura da válvula. Além de que após o fechamento da VSD64 não há fluxo de gás, fazendo com que as partículas caiam em queda livre. Ainda assim, com o menor tempo de abertura de válvula utilizado na maior diferença de pressão não houve variação significativa em relação às partículas na menor diferença de pressão e curtos tempos de t_4 . A maior diferença de pressão entre as zonas do simulador junto com o maior tempo de abertura de válvula geraram as velocidades mais satisfatórias, visto que com tempos mais longos da VSD64 aberta, mais tempo as partículas estão submetidas ao arraste de gás impulsionado pela força motriz mais potente. E, também, evidenciou-se que as faixas granulométricas menores passam a surtir efeito positivo sobre a velocidade das partículas.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) para realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Carpenter AM. Use of PCI in blast furnaces. London: IEA Coal Research; 2006.
- 2 Fragoso, H. P. Avaliação da combustibilidade de carvões em simulador de PCI: evolução da metodologia de operação. Dissertação - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 2019.
- 3 Rene, R. L. Desenvolvimento de equipamento para estudos de injeção de carvão pulverizado em altos-fornos siderúrgicos. Tese - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 2018.
- 4 Motta, M. N; Barbieri, C. C. T; Machado, A. S; Rech, R. L; Osório, E; Vilela, A. C. F. Automação do ensaio de combustão de um simulador de PCI, p. 21-29. In: *17º Enemet*, São Paulo, 2017.
- 5 Neogi. A; Mohanta. H. K; Sande. P. C. Particle image velocimetry investigations on multiphase flow in fluidized beds: A review. Birla Institute of Technology & Science. India.