

CONTROLE FUZZY-PI APLICADO AO PROCESSO DE RECOBRIMENTO DE PARTÍCULAS EM LEITO FLUIDIZADO GÁS-SÓLIDO

C. A.M. SILVA, K. ANDREOLA, F. V. SILVA e O.P. TARANTO

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química
E-mail para contato: camseq2010@gmail.com

RESUMO – O monitoramento e controle on-line em processos de recobrimento de partículas são desejáveis, possibilitando regime de fluidização estável. Este trabalho teve como objetivo a construção de um sistema de controle Fuzzy para o processo de recobrimento em leito fluidizado, a fim de garantir a estabilidade da fluidização, boas condições de secagem e aglomeração reduzida. Para o monitoramento da fluidização aplicou-se a metodologia de análise espectral e o crescimento em tempo real foi avaliado por uma sonda Parsum IPP70. Através das informações da fluidodinâmica desenvolveu-se a estratégia de controle Fuzzy. Foi observado que, para todas as condições estudadas, o processo controlado manteve um conteúdo de umidade menor, considerando o mesmo volume de suspensão atomizado. Através do monitoramento do tamanho das partículas com controle Fuzzy, foi verificado um crescimento mais significativo. O ponto final de operação foi definido com mais facilidade sem perder a estabilidade fluidodinâmica.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de um sistema de monitoramento e controle on-line em processos de recobrimento e granulação de partículas é extremamente desejável para permitir a operação de um regime de fluidização borbulhante estável, o qual conduzirá a distribuições homogêneas nas propriedades do material sólido processado, em termos de densidade, umidade, distribuição de tamanho, escoabilidade, etc. As variáveis comumente monitoradas em plantas de recobrimento e granulação (umidade e temperatura do ar de saída, temperatura do leito, queda de pressão e variação de temperatura através do leito, conteúdo de umidade das partículas), não detectam o aparecimento do fenômeno de defluidização nos estágios iniciais e também não produzem informações sobre o diâmetro da partícula. Portanto, estas variáveis apresentam limitações para serem usadas como variáveis controladas em uma malha fechada de controle. Os trabalhos de controle em tempo real dos parâmetros críticos em operações de recobrimento e granulação são bastante escassos na literatura.

Watano *et al.* (1993) utilizaram um sensor de umidade por infravermelho para monitorar e controlar o processo de recobrimento de partículas de celulose cristalina com Eudragit L30D-55, empregando uma estratégia de controle PID. Os autores observaram excelentes propriedades das partículas quanto à taxa de dissolução (liberação) do filme e a formação de aglomerados foi reduzida controlando o processo continuamente. Silva *et al.* (2011) utilizou a metodologia de análise espectral

Gaussiana e explorou o grande potencial desta na implementação de uma estratégia de controle baseada em algoritmo PID para monitorar e controlar em tempo real o processo de recobrimento de partículas, alcançando melhorias significativas nas condições fluidodinâmicas comparando com o processo sem controle.

O objetivo deste trabalho foi comparar a evolução do conteúdo de umidade do leito e do tamanho in-line das partículas, para o processo de recobrimento de celulose microcristalina em leito fluidizado com e sem aplicação de controle em malha fechada. A metodologia de análise espectral Gaussiana dos sinais de flutuação de pressão (Parise *et al.*, 2008) foi utilizada para identificar as instabilidades no comportamento da fluidização e para compor o sistema de controle inteligente Fuzzy-PI desenvolvido para manter condições estáveis de fluidização.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Celulose microcristalina (Blanver Farmoquímica) com granulometria obtida em peneiras na faixa de 300 a 350 micra foi recoberta utilizando-se uma suspensão aquosa polimérica à base de Eudragit L30-D55 (Silva, 2009), de coloração vermelha para avaliar visualmente as modificações fluidodinâmicas sofridas.

2.2. Sistema experimental

O sistema experimental é composto de uma coluna de fluidização convencional construída em acrílico, com diâmetro interno de 0,143 m e altura de 0,70 m. Um soprador de ar de 7,5 HP é utilizado para a promoção da fluidização das partículas e, este é conectado a um inversor de frequência WEG (CFW 08), para regular a rotação do motor do soprador. A temperatura do ar na câmara plenum do leito fluidizado é mantida em valores definidos por um conjunto de resistências elétricas e, estas são controladas por um regulador PID (NOVUS, N1200). A vazão do ar é determinada por meio de uma placa de orifício. As medidas de pressão são feitas por um transdutor diferencial de pressão (Smar, LD301, range: 0,12 a 5,00 kPa) e um transdutor de pressão (Cole Parmer, 07356-01, range: 0 a 211 kPa), respectivamente. A pressão no leito é medida por um transdutor diferencial (Cole Parmer, 68014-18, range: 0 a 6,2 kPa, tempo de resposta de 250 ms). Os sensores de pressão estão acoplados ao computador por sistema de aquisição de dados composto de uma placa NI cDAQ-9172 (National Instrument). Uma bomba peristáltica (Cole Parmer, 7780-60, Masterflex L/S) é utilizada para o transporte da solução de recobrimento até um bico atomizador do tipo duplo fluido (Spraying Systems, SU12A).

2.3. Monitoramento do regime de fluidização: Análise espectral Gaussiana

O monitoramento do regime de fluidização foi realizado utilizando-se a análise espectral Gaussiana. Esta análise consegue detectar transições de regime de fluidização de forma bastante evidente através de mudanças na amplitude e nos conteúdos de frequência dos espectros. Esta metodologia consiste na realização de uma análise estatística sobre a distribuição espectral de pressão,

a qual é ajustada a uma função exponencial semelhante à função de distribuição normal Gaussiana. A frequência média Gaussiana e o desvio padrão da distribuição espectral de pressão refletem as características de borbulhamento no leito, tais como: regime borbulhante, instantes iniciais do aparecimento de defluidização (aglomeração) e o leito fixo. As etapas que foram realizadas para o emprego da metodologia neste trabalho encontram-se descritas em Silva *et al.* (2011).

2.4. Monitoramento do tamanho das partículas: Velocimetria de Filtro Espacial

Para o monitoramento do tamanho das partículas foi empregada uma sonda Parsum IPP 70 (Chemnitz, Alemanha) que utiliza o princípio de velocimetria de filtro espacial para medir a velocidade e a “corda” (tamanho) das partículas. Este princípio baseia-se na evolução da sombra deixada pelas partículas, a qual é criada quando um feixe de laser atravessa o material particulado que está em movimento aleatório. A frequência do sinal (f_0) é medida por fotodetectores e é proporcional a velocidade da partícula. A velocidade da partícula é dada por $g \cdot f_0$, em que g é a distância entre dois fotodetectores. Como as partículas passam através do feixe de laser, um segundo pulso de sinal secundário é gerado por uma simples fibra óptica. De posse do tempo do sinal t , da velocidade v da partícula e do diâmetro da fibra óptica d , o comprimento de corda x pode ser calculado, que representa o tamanho da partícula. O *software* “Inline Particle Probe 7.14” processa as informações dos sinais obtidos pela sonda e fornece as distribuições de tamanho. Os dados obtidos pelo *software* da sonda são enviados para o LabVIEW através de protocolo OPC Server.

2.5. Desenvolvimento do sistema de controle Fuzzy

Definição das variáveis controladas e manipuladas do processo: A metodologia de análise espectral Gaussiana tem se mostrado eficiente para identificar os instantes iniciais do fenômeno de defluidização através do monitoramento da frequência média Gaussiana (f_m) (Silva, 2009). Por esta razão, a frequência média foi escolhida como variável controlada. As variáveis manipuladas foram as vazões de ar de fluidização (controle de um inversor de frequência) e a vazão de líquido atomizado sobre o leito (controle de uma bomba peristáltica). O projeto do controlador Fuzzy-PI consistiu basicamente no desenvolvimento das etapas descritas a seguir.

Definição do universo de discurso para as variáveis de entrada e saída: A modelagem Fuzzy do processo foi realizada até a condição dos instantes iniciais do surgimento da defluidização, onde os valores de frequência oscilam por volta dos 5,0 Hz, uma vez que o objetivo do controle é não permitir, em hipótese alguma, que ocorra esta condição de fluidização. Deste modo, o universo de discurso para frequência média foi tomado como de 5,0 a 7,0 Hz. O universo de discurso do erro (FC – set-point [6,0Hz]) foi tomado como [-1,1] e da variação do erro ($e(t) - e(t-1)$) foi [-0,4;0,4]. A faixa de saída para o inversor de frequência foi definida de 2,0 a 2,3 volts. O valor mínimo no sinal do inversor representa a condição de operação desejada ($u_0 - u_{mf} = 0,16$ m/s) e o valor máximo ($u_0 - u_{mf} = 0,25$ m/s) foi definido para garantir um regime de fluidização borbulhante explosivo, caso o processo dirija-se a situações muito críticas de defluidização. Para a bomba peristáltica a faixa de saída variou de 0,25 a 0,82 volts. O nível mais baixo ($Q_{susp} = 3,0$ mL/min) na bomba peristáltica representa uma condição de segurança, pois em ameaças de defluidização (frequências menores que 6,0 Hz), o leito poderá encontrar condições de recuperar o regime de fluidização estável. O nível mais alto ($Q_{susp} =$

10,0 mL/min) para o sinal da bomba é a condição operacional desejada.

Implementação das funções de pertinência: Os termos linguísticos, que representam uma comunicação verbal entre os valores das variáveis controladas e o fenômeno físico envolvido, foram definidos da seguinte forma: GP (grande positivo), MP (médio positivo), PP (pequeno positivo), ZR (zero), PN (pequeno negativo), MN (médio negativo) e GN (grande negativo). Os termos GP, MP e PP caracterizam o leito fluidizado borbulhante; ZR o momento em que o leito tende a defluidização; PN e MN é a defluidização parcial onde ocorre uma drástica redução da intensidade de borbulhamento e GN é a defluidização crítica em que ocorre expansão do leito e desaparecimento das bolhas, existem apenas canais e pequenos “slugs” que explodem e levantam as partículas. Nas variáveis manipuladas os termos linguísticos foram definidos de forma similar. Para a bomba GP (Condição Operacional de Processo) e GN (valor mínimo de vazão). Para o inversor GP (valor máximo de vazão) e GN (Condição Operacional de Processo).

Base de conhecimento dos controladores Fuzzy: A terceira etapa da implementação do controlador Fuzzy é a definição de um conjunto de regras que irão descrever a relação entre as variáveis de entrada e saída, com base no conhecimento empírico do especialista do processo acerca do fenômeno físico. Nesta fase foram utilizados os operadores lógicos (“e”, “ou” e “então”) e um processo de inferência do tipo Mandani. As regras seguindo o modelo proposto por Li e Gatland (1996) foram modificadas de acordo com o conhecimento do especialista para tentar descrever o melhor esquema da atuação sobre as variáveis manipuladas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Ensaios com controle Fuzzy-PI

Os ensaios foram realizados sem e com a aplicação da estratégia de controle Fuzzy-PI. Também são apresentados os resultados obtidos em uma condição drástica de atomização, com uma vazão de suspensão de 10,0 mL/min. As Figuras 1 (a) e (b) mostram a evolução das variáveis críticas do processo, o regime de fluidização, o tamanho da partícula e o conteúdo de umidade em função do consumo de suspensão polimérica. Este ensaio foi realizado sem controle de processo, isto é, com atomização contínua de suspensão. O processo foi conduzido até a completa aglomeração das partículas e a perda total da estabilidade fluidodinâmica com o objetivo de realizar comparações com o processo sob a forma controlada por Fuzzy-PI. Pode-se perceber pela Figura 1 (a) que a distribuição de tamanho inicial situa-se abaixo de 340 μm , concordando com o que foi obtido pelo peneiramento, uma vez que as partículas utilizadas estavam entre as peneiras de 0,30 e 0,35 mm. Com o início da atomização, pode-se observar que a sonda Parsum detectou o crescimento das partículas. Entre 184 a 345 mL de adição de suspensão o tamanho médio oscilou entre 340 a 380 μm . Até a adição de 411 mL as partículas já se encontravam acima de 400 μm . Antes da atomização as partículas tinham um tamanho médio em torno de 325 μm , exatamente a média entre as peneiras de 0,30 e 0,35 mm. Até a adição de 263 mL passaram a ter 370 μm e neste consumo de suspensão foi observado o início da defluidização e aglomeração das partículas. Houve um abaixamento na frequência para a linha dos 6,0 Hz identificando esta fase, como se pode observar na Figura 1 (a). O abaixamento tênue da frequência se deve a inserção da sonda no leito, que acaba interferindo no rearranjo das partículas, criando um

imenso canal preferencial nesta região, o que dificultou a detecção imediata da defluidização, em que as frequências seriam inferiores a 6,0 Hz. Foram retiradas algumas alíquotas do processo em torno de 2,0 g para análise do conteúdo de umidade utilizando a balança de Halôgenio HR83 (Mettler Toledo). A evolução da umidade da partícula pode ser vista na Figura 1 (b) juntamente com o tamanho. Percebe-se que umidade aumentou até o final da atomização chegando a quase 16%(bu). Com 263 mL a umidade ficou acima da umidade crítica da celulose que é em torno de 10% (Parise, 2007; Silva, 2012). Se a energia térmica do leito não é equilibrada a tendência é o surgimento do fenômeno de defluidização acima deste valor crítico.

Na Figura 2 é mostrada a evolução visual do comportamento da fluidização para cada consumo de suspensão. No início da atomização (Figuras 2 (a) e (b)) pode-se observar as bolhas de gás e o material tem ótima escoabilidade dentro leito. Com a atomização de 263 mL (Figura 2 (c)) já se observam regiões estagnadas e com 345 mL (Figura 2 (d)) não existem bolhas apenas canais preferenciais, localizados na parte inferior do leito. No final da atomização quando foram adicionados 411 mL de suspensão (Figura 2 (e)), a situação da defluidização era irreversível, em que podem ser vistos os aglomerados na parte inferior e o leito totalmente empacotado. As fotografias confirmam o surgimento da defluidização.

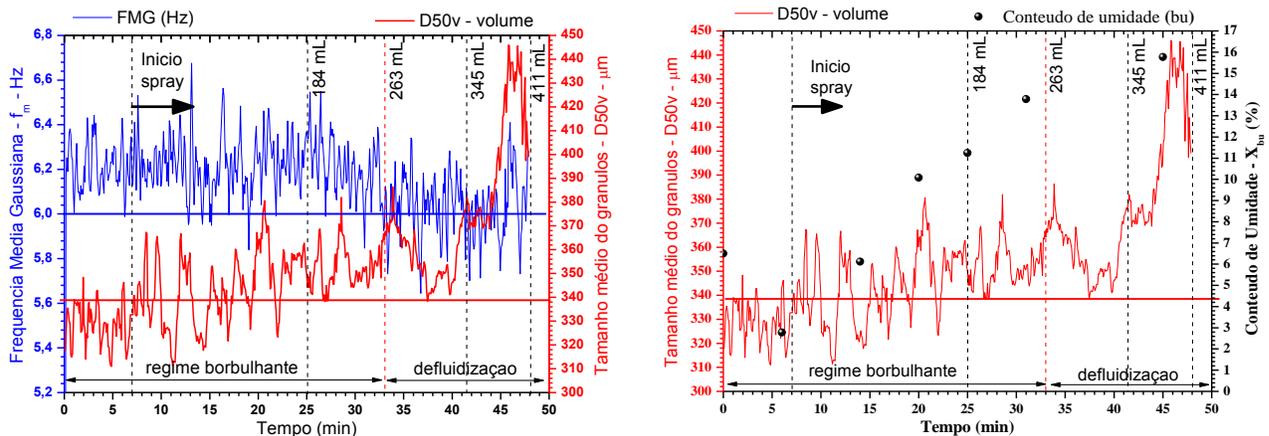


Figura 1 – (a) Evolução da frequência média e tamanho médio (volume). (b) Evolução do conteúdo de umidade e tamanho médio (volume). SEM CONTROLE DE PROCESSO.

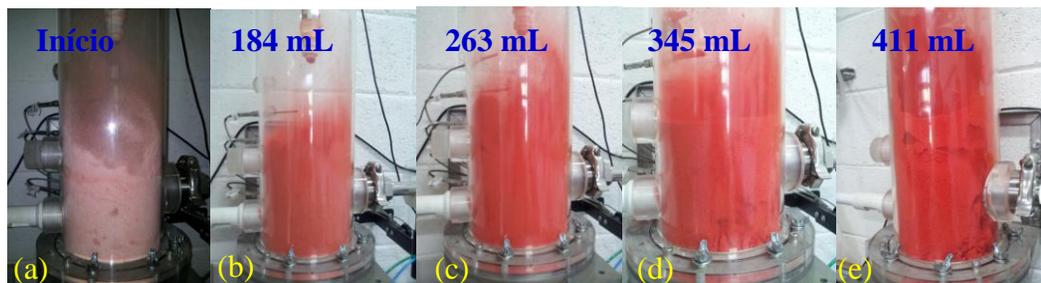


Figura 2 – Fotografias do comportamento dinâmico SEM CONTROLE DE PROCESSO.

A Figura 3 (a) compara o crescimento das partículas com as condições fluidodinâmicas do leito em função do consumo de suspensão para o processo controlado. Sobre o crescimento das partículas, pode-se observar que atingiram 450 μm com um consumo de 263 mL e não houve defluidização nestes instantes do processo. Para o processo sem controle, nesta mesma alimentação de suspensão, o tamanho das partículas não chegou a 400 μm . Se pensarmos inicialmente na operação de recobrimento o tamanho inicial das partículas estava entre 300 a 350 μm . Como o aumento de tamanho esperado na operação de recobrimento em geral não é tão pronunciado, um filme de 20 μm de espessura, por exemplo, produziria partículas entre 340 a 390 μm . Até o momento, não foi determinada a espessura do filme. Um questionamento que surge reside no tamanho do aglomerado. A atomização de 263 mL de suspensão produziu partículas com tamanho médio de 450 μm . Isto é o início da aglomeração? A celulose microcristalina tem esfericidade de 0,85 determinada por Polastri (2011), isto é, são razoavelmente esféricas. Watano *et al.* (1994) definiu sua fração de aglomerados considerando a aglomeração teórica de 3 partículas esféricas e calculou como diâmetro do aglomerado 1,87 vezes o tamanho da partícula individual. Seguindo este modelo e com tamanho inicial de 300 μm teríamos aglomerados de 561 μm . Com a partícula recoberta em 340 μm teríamos aglomerados em 635,8 μm . Portanto, tomando este referencial teórico, não teríamos aglomerados nesta fase, em que no processo sem controle já começava a dar sinais de perda de estabilidade fluidodinâmica. Observando os vídeos que foram realizados durante o processo, percebeu-se que quando se atomizou a mesma quantidade de suspensão no processo controlado (411 mL), que levou ao colapso do leito sem controle, o leito fluidizado controlado ainda se mantinha estável, mas já haviam canais preferenciais e aglomerados na parte inferior. Entretanto, desde ponto em diante, a situação do leito começou a piorar e o tamanho das partículas ficou acima de 500 μm e a frequência média Gaussiana ficou abaixo do *set-point* de 6,0 Hz mostrando o surgimento da defluidização. Silva *et al.* (2011) mostrou resultados similares da perda de estabilidade no processo controlado por controle convencional PI (proporcional-integral) quando adicionou 370 mL de suspensão de Eudragit.

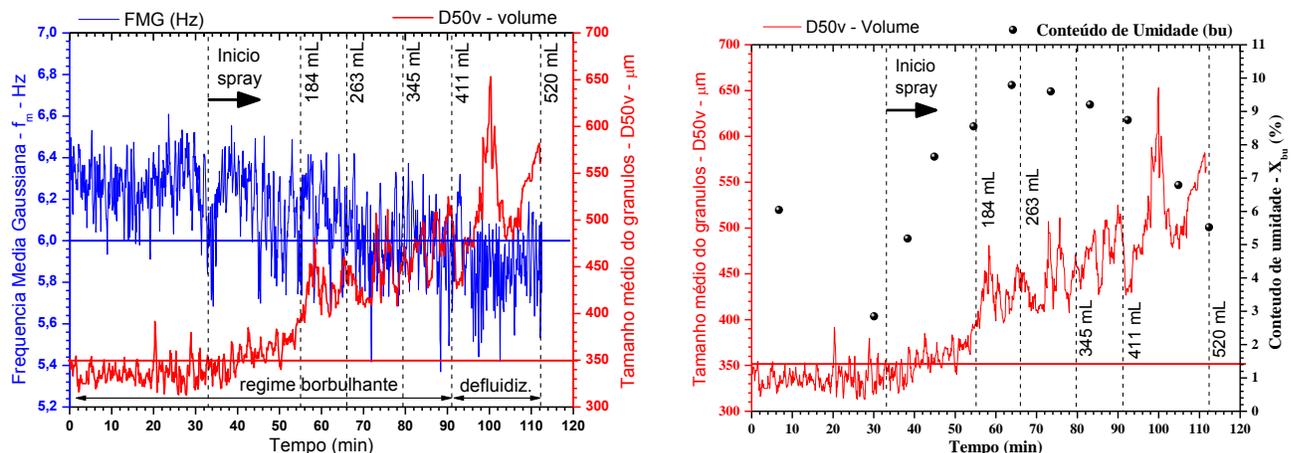


Figura 3 – (a) Evolução da frequência média e tamanho médio (volume). (b) Evolução do conteúdo de umidade e tamanho médio (volume). COM CONTROLE DE PROCESSO.

As Figuras 4 (a), (b) e (c) mostram a evolução visual do processo em regime de fluidização estável, onde é possível se observar as bolhas de gás da fluidização. Na Figura 4 (d), o consumo de

suspensão foi extrapolado a 520 mL e o leito não suportou o excesso de umidade, mesmo sob controle, e pôde-se observar muitos aglomerados na parte inferior do leito. Alíquotas em torno de 2,0 g também foram retiradas do leito para determinação da umidade das partículas. Pode-se observar, Figura 3 (b), que o teor de umidade não atingiu 10% em 263 mL de suspensão atomizada, momento em que no processo sem controle a umidade estava acima de 13% e continuou aumentando até o fim do processo com o colapso. Observando a Figura 3 (a), nota-se que a frequência começa a oscilar com maior intensidade na linha do *set-point* em 6,0 Hz a partir de 263 mL, isto é, o controle tentou manter a fluidização em 6,0 Hz, aumentando a vazão de gás e reduzindo a taxa de suspensão. O resultado desta atuação do controle foi a secagem das partículas. Entretanto, percebe-se que o tamanho da partícula aumentou drasticamente indicando o surgimento de aglomeração (Figura 3 (b)). Watano *et al.* (1994) também observou aglomeração de partículas de celulose esféricas em conteúdo de umidade de 8 e 10% (bu) sob a atomização com Eudragit L30-D55.

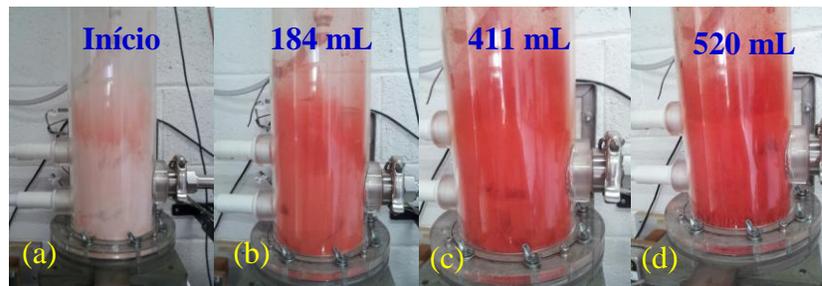


Figura 4 – Fotografias do comportamento dinâmico COM CONTROLE DE PROCESSO.

4. CONCLUSÕES

O conteúdo de umidade foi avaliado de forma off-line e o tamanho das partículas de forma in-line, pois é conhecido que estas variáveis influenciam diretamente a dinâmica da fluidização, causando aumento das forças coesivas entre as partículas quando em excesso. Foi observado que o processo controlado manteve um conteúdo de umidade sempre mais baixo em relação ao processo sem controle, considerando o mesmo volume de suspensão atomizado. Foi mostrado que aplicando-se controle ao processo, o balanço entre a taxa de absorção de umidade e a taxa de secagem do sólido torna-se mais eficiente, favorecendo maior evaporação da umidade superficial, pois a umidade em excesso causa a intensificação das forças de adesão entre as partículas. No processo sem controle, este balanço é mantido por um determinado instante de tempo, contudo, como não há uma remoção suficiente da umidade superficial, ocorre o fenômeno de defluidização. Quanto ao tamanho da partícula, utilizando-se a sonda Parsum in-line no processo, o ponto final de operação pode ser definido com mais facilidade sem levar a perda de estabilidade fluidodinâmica do leito, basta saber até onde o crescimento é adequado para o processo. A região em torno de 450 μm poderia ser o ponto final do processo. Portanto, avistou-se o grande potencial do uso desta ferramenta em sistemas de monitoramento, uma vez que o tamanho das partículas é um parâmetro crítico e necessita ser monitorado e controlado em muitos processos de transformação envolvendo sólidos particulados.

5. REFERÊNCIAS

- LI H. X.; GATLAND H. B. Conventional fuzzy control and its enhancement. *IEEE T. Syst. Man Cyb.*, v. 26, p. 791-797, 1996.
- PARISE, M. R. Aplicação da distribuição espectral normal em leito fluidizado gás-sólido. 2007. 132 f.. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- PARISE, M. R.; TARANTO O. P.; KURKA P. R. G.; BENETTI L. B. Detection of the minimum gas velocity region using Gaussian spectral pressure distribution in a gas-solid fluidized bed. *Powder Technol.*, v. 182, p. 453-458, 2008.
- POLASTRI, P.R.; SILVA C.A.M.; TARANTO O.P. On-line monitoring of fluidization regimes in coating process of diclofenac sodium pellets using Gaussian spectral analysis. In: *IX Congresso Brasileiro de Engenharia Química – Iniciação Científica*, Maringá, Paraná, Brasil, Julho 03–06, 2011.
- SILVA, C. A. M. Aplicação da metodologia de análise espectral Gaussiana para monitorar e controlar a defluidização em processo de recobrimento de partículas. 2009. 145 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.
- SILVA C. A. M.; PARISE M. R.; SILVA F. V.; TARANTO O. P. Control of fluidized bed coating particles using Gaussian spectral pressure distribution. *Powder Technol.*, v. 212, p. 445–458. 2011.
- SILVA C. A. M.; BUTZGE J. J.; TARANTO O. P. Estudo sobre a aplicação de estratégias de controle on-line em processo de umedecimento de celulose microcristalina em leito fluidizado gás-sólido: avaliação do conteúdo de umidade do leito. In: *XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química*, Búzios, Rio de Janeiro, Brasil, Setembro 09-12, 2012.
- WATANO, S.; HARADA, T.; TERASHITA, K.; MIYANAMI, K. Development and application of moisture control system with IR moisture sensor to aqueous polymeric coating process. *Chem. Pharm. Bull.*, v. 41, p. 580-585, 1993.
- WATANO, S.; YOSHIKAWA, K.; MYANAMI, K. Evaluation of aqueous enteric coated granules prepared by moisture control method in tumbling fluidized bed process. *Chem. Pharm. Bull.*, v.42, p. 663-667, 1994.