



## **MONITORAMENTO DAS TRANSIÇÕES DE REGIMES FLUIDODINÂMICOS EM UM LEITO DE JORRO USANDO TRANSFORMADA *WAVELET***

VINICIUS S. S. MACHADO<sup>1</sup>, JOSÉ J. BUTZGE<sup>2</sup>, OSVALDIR P. TARANTO<sup>2</sup>, CARLOS A. M.  
DA SILVA<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de São Paulo, Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas,  
Departamento de Engenharia Química, São Paulo, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Departamento de  
Engenharia de Processos, São Paulo, Brasil

\*e-mail: alexandre.carlos@unifesp.br

**RESUMO** - O objetivo do trabalho foi empregar a transformada *wavelet* em sinais de flutuações de pressão para a identificação dos regimes de fluidodinâmicos (leito fixo, jorro interno, mínimo jorro e jorro estável) durante a evolução da curva fluidodinâmica usando partículas esféricas de vidro de 2,6 mm. Os sinais de pressão foram obtidos por Butzge (2012) e foram processados de forma *off-line* aumentando e reduzindo-se a velocidade do ar. A evolução dos perfis de razão de energia das estruturas de escala contidas nos sub-sinais mostrou-se muito promissora para um mapeamento detalhado das faixas de frequências predominantes de cada regime fluidodinâmico. A macroescala é dominante no leito fixo e nas proximidades do jorro interno, enquanto no jorro estável, a mesoescala é a estrutura dominante. A entropia *wavelet* de Shannon e o índice de homogeneidade mostraram ser parâmetros confirmatórios das reorganizações de regime, identificando valores mínimos e máximos bem localizados, no surgimento do jorro interno e do mínimo jorro, respectivamente.

### **INTRODUÇÃO**

O leito de jorro consiste em um equipamento amplamente utilizado em processos de secagem, recobrimento e aglomeração de sólidos, devido ao movimento ordenado e cíclico desenvolvido pelas partículas, que promove altas taxas de transferência de calor e massa (Epstein e Grace, 2010). O sucesso das operações que utilizam o leito de jorro depende da manutenção de uma estabilidade constante do regime de jorro, sendo de extrema importância o desenvolvimento de pesquisas na área de identificação de regimes fluidodinâmicos. Sun e Yan (2016) reportaram que o uso de medidas de pressão em leitos é uma alternativa robusta, relativamente barata e não intrusiva, que evita a distorção do fluxo no ponto de medição, porém é um desafio a interpretação dos sinais gerados.

Neste trabalho foram processados de forma *off-line*, utilizando a transformada *wavelet*, os sinais de queda de pressão de Butzge (2012), obtidos em um leito de jorro. A transformada *wavelet* é uma promissora ferramenta de processamento dos sinais, pois permite a análise das múltiplas estruturas de escalas presentes processos envolvendo interações fluido-partículas. As estruturas de escalas podem ser correlacionadas com a distribuição de energia nos sub-sinais provenientes da decomposição da transformada *wavelet*. Nesta análise podem ser consideradas as diferentes escalas de interações partícula-partícula, interações entre *clusters* (blocos de partículas) e a fase diluída e as interações incluindo efeitos da fronteira do processo (Li, 2000). As escalas de interação comumente estudadas são chamadas de micro, meso e macroescala do leito. Neste presente trabalho,

os resultados da análise *wavelet* foram confrontados com a evolução da curva fluidodinâmica em velocidade crescente e decrescente do ar objetivando-se monitorar as transições de regime.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Procedimento experimental

Os ensaios fluidodinâmicos em leito seco realizados por Butzge (2012) tinham o objetivo de determinar a região e a velocidade de mínimo jorro. A geometria do leito usada foi a cônica-cilíndrica. A coluna cilíndrica tem 200 mm de diâmetro interno e altura de 500 mm. Vários degraus com pequenas amplitudes foram introduzidos no inversor de frequência, de modo que, a vazão de ar fosse aumentada de 0 até produzir um jorro estável, passando desta maneira pelo leito fixo, jorro interno, mínimo jorro e, finalmente, o jorro estável. Deste modo, pelo aumento e pela redução da vazão de ar, a queda de pressão foi medida por transdutores de pressão. Como resultado deste ensaio, obtém-se a curva fluidodinâmica (velocidade do ar vs queda de pressão média). A velocidade do ar foi calculada em função da área da seção transversal do cilíndrico. Foram fixadas, a temperatura do ar na câmara *plenum*, a pressão de atomização, a massa do leito e o diâmetro das partículas, respectivamente, em: 70°C, 10 psi, 1,0 (Ensaio 1) e 1,5 kg (Ensaio 2) e 2,6 mm, respectivamente.

### Monitoramento pela transformada *wavelet*

Foram utilizados os sinais de pressão adquiridos em um leito de jorro com 2048 pontos a uma taxa de 400 Hz, por meio de um transdutor de pressão (Cole Parmer®, 250 ms de tempo de resposta) e um sistema de aquisição de dados (NIcDAQ 9172, *National Instruments™*). Foi utilizada a transformada *wavelet* para decompor os sinais originais em 10 sub-sinais. O processamento dos sinais de flutuação de pressão foi realizado de forma *off-line*, para a decomposição dos sinais. O código desenvolvido é baseado no algoritmo de múltipla resolução, que subdivide o sinal original em sub-sinais. Neste processo de decomposição, a escala é inversamente proporcional à frequência, de modo que as menores escalas correspondem as mais altas

frequências do sinal, enquanto as maiores escalas compreendem as menores faixas de frequência. No algoritmo de decomposição desenvolvido por Mallat (1989), os sinais de flutuação de pressão geram sub-sinais de detalhes e de aproximação. Os sinais de detalhes contêm as informações mais detalhadas do sinal (maior frequência), enquanto o sinal de aproximação guarda as informações mais grosseiras do sinal (menor frequência). A perfeita reconstrução dos sinais por transformada *wavelet* depende da função *wavelet* escolhida, por isso, foi utilizada no processamento dos sinais, a função Symlet de nona ordem (sym9), baseados no critério do menor erro de reconstrução e da menor entropia *wavelet* de Shannon. Foi realizado neste trabalho a análise das razões de energia dos sub-sinais da transformada *wavelet*, a evolução da entropia *wavelet* de Shannon e do índice de homogeneidade do leito, em função do aumento da redução da velocidade do ar. Cada razão de energia foi calculada pela relação entre as somas das amplitudes quadráticas dos sub-sinais em cada escala com soma das amplitudes quadráticas do sinal original. A entropia *wavelet* de Shannon é a composição da soma logarítmica das razões de energia dos sub-sinais de detalhes (Yang e Wang, 2015). Yang e Leu (2008) utilizaram o índice de homogeneização para determinação da transição de regimes fluidodinâmicos em um leito fluidizado, que é calculado por meio da razão entre largas estruturas de escala (energias da meso e macroescala) pelas estruturas de menor escala (microescala). Machado *et al.* (2021) mostra em detalhes os procedimentos de cálculos da transformada *wavelet*. Os parâmetros oriundos da Transformada *wavelet* foram validados com as observações experimentais e pelo confronto com a análise de regimes obtidos da curva fluidodinâmica do leito de jorro.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Ensaio 1 (m = 1,0 kg)

A curva fluidodinâmica que está mostrada Figura 1a avalia a evolução da queda de pressão sobre o leito em função do aumento da velocidade de ar no leito (curva de ida) e da redução da velocidade do ar (curva de volta). Três regiões distintas foram separadas de

acordo com os regimes dominantes, observados por Butzge (2012). Região A, B e C compreendem o fenômeno de leito fixo, jorro interno e jorro estável, respectivamente.

Na Região A para baixas velocidades (até 0,175 m/s), a queda de pressão encontra-se em sua faixa linear e o leito ainda está compactado, uma vez que a velocidade de gás é insuficiente para promover a movimentação das partículas. A Região B compreende a faixa de velocidades em que ocorre a formação do jorro interno e sucessivas tentativas de impor o regime de jorro do leito. A partir de 0,175 m/s, o ar alcança energia para iniciar uma movimentação das partículas na região de entrada do leito, formando o que se chama de arco interno. Dentro desta região, ocorrem sucessivos desmoronamentos das partículas, que provocam elevada aleatoriedade dos sinais de flutuação. Por volta de 0,225 m/s, ocorrem as reduções mais significativas da queda de pressão, devido ao aumento de porosidade do leito e a formação de um jorro interno cada vez mais profundo. De acordo com Butzge (2012), na região que compreende as velocidades de 0,275 a 0,31 m/s, ocorrem flutuações de pressão ocasionadas por “pulsações” do jorro interno, até que a velocidade do ar alcance o suficiente para estabilizar o jorro. Neste trecho, os sinais de flutuação de pressão se assemelham com as características ligeiramente periódicas do jorro estável.

Seguindo a mesma metodologia adotada para a primeira fase de processamentos dos ensaios fluidodinâmicos, foi utilizada a subdivisão das bandas de razão de energia provenientes da análise *wavelet* em três escalas (micro, meso e macroescala), as quais são correlacionadas com os movimentos característicos dos regimes de jorro. Até o presente momento, esta análise em escalas foi amplamente usada em sistemas de fluidização e ainda não foi reportada seu uso em leito de jorro. A Figura 1b mostra a evolução das estruturas de escala e das tendências médias (smooth) como estratégia de monitoramento para a confirmação dos regimes observados. Como se pode observar pela Figura 1b, região A, o regime do leito fixo é caracterizado pela

preponderância da macroescala (0,195 a 3,125 Hz – sub-sinal A10 e sub-sinais D6 a D10), com a maior parte do conteúdo energético estando acima de 70%, ou seja, é um estado fluidodinâmico de baixa frequência, associado com o escoamento do gás nos interstícios do leito e com os sinais de flutuação de pressão com amplitudes distribuídas aleatoriamente. O restante da composição das razões de energia está na microescala (sub-sinais D1 a D4, 200 a 12,5 Hz), entre 10 a 30%, que é correlacionado segundo Jiang (2012) por ruídos do soprador ou como segundo Frey (2005) com a micro turbulência do escoamento, à medida que velocidade do ar aumenta.

Na Região B da Figura 1b, pode-se destacar duas regiões distintas: antes e depois de 0,225 m/s. Entre 0,175 e 0,225 m/s, tem-se velocidade insuficiente para a formação de uma fonte com movimento ordenado de partículas, e desta forma, o que ocorre são sucessivos desmoronamentos do leito, onde as baixas frequências preponderam devido ao movimento caótico das partículas. A energia da macroescala chega a atingir um patamar de 100% devido à baixa correlação entre os sinais da transformada wavelet e o sinal original de pressão. Neste trecho, os sinais são muito aleatórios. Entre 0,225 a 0,31 m/s, os sinais começam a apresentar características mais ordenadas e periódicas e observa-se uma diminuição abrupta na macroescala e simultaneamente o aumento da mesoescala (sub-sinal D5, 6,25 a 12,5 Hz), a qual está intrinsecamente atrelada à dinâmica cíclica de movimento do jorro. Nesta fase, a transferência de parte da energia da macro para mesoescala ocorre em função do início da movimentação periódica das partículas, porém apenas no formato de jorro interno. As altas amplitudes de energia da macroescala em uma ampla extensão de velocidades do ar indicam a baixa macroestabilidade dos regimes com um todo. Seguindo a análise de Zhao e Yang (2003), os eventos nesta região seriam de natureza totalmente instável, tais como a formação do arco interno e o rompimento da estrutura sólida na superfície do leito.

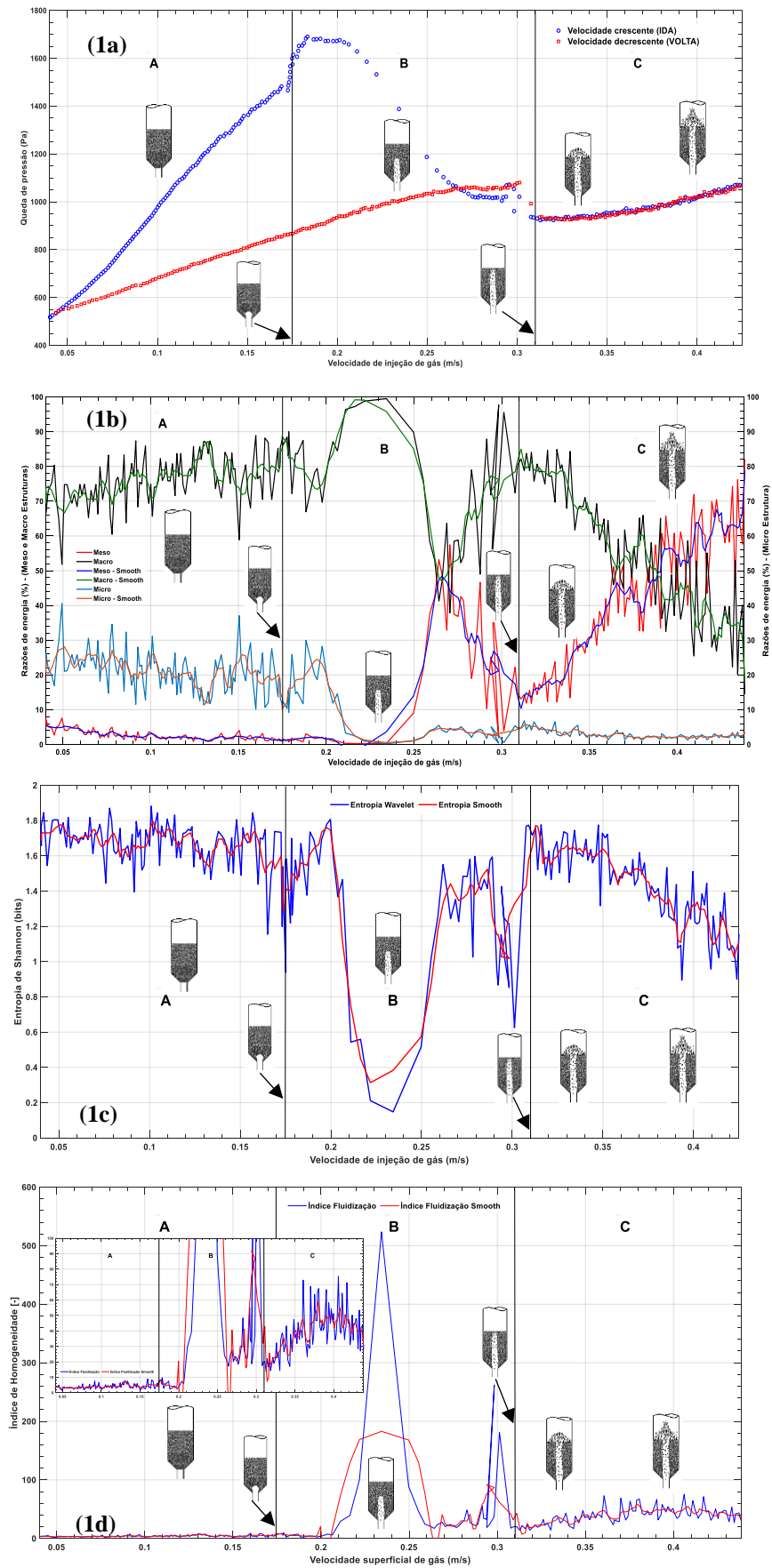


Figura 1: (a) Curva fluidodinâmica. (b) Razão de energias das escalas. (c) Entropia *wavelet* de Shannon. (d) Índice de Homogeneização.

A faixa de velocidades da Figura **1b** Região C permite a estabilização do regime de jorro, com a formação completa da fonte acima da superfície do leito, que pode ser visto pelo aumento e redução gradual da mesoescala e macroescala, respectivamente. A partir de 0,39 m/s, a mesoescala começa a apresentar magnitude superior a macroescala e atinge um patamar entre 60 e 70% da energia dos sinais. O movimento circular intenso das partículas no jorro é um indicativo da mudança de domínio de interação, passando inicialmente pelo domínio da fase fluida ( $< 0,39$  m/s), equilíbrio de interações das fases sólida e fluida ( $= 0,39$  m/s) e maior domínio da fase particulada ( $> 0,39$  m/s) (Li, 2000).

As Figuras **1c** e **1d** apresentam a entropia *wavelet* de Shannon e o índice de homogeneização. Ambos os parâmetros possuem mudanças abruptas nas suas grandezas nos momentos de transição mais intensas na fluidodinâmica do jorro. Percebeu-se que os valores de mínimo dos parâmetros, confirmam novas reorganizações de regime.

É relatado na literatura, ser possível correlacionar quantitativamente as informações contidas em series temporais com a entropia *wavelet* de Shannon, uma vez que seu valor é referente ao grau de ordem ou desordem do sinal. Sinais periódicos exibem um comportamento de frequência única, enquanto sinais não-periódicos exibem diversas componentes de frequência. Desta forma a entropia *wavelet* de Shannon pode variar de 0 a um valor máximo como consequência do aumento da desordem do sistema (Ródenas *et al.*, 2015). Portanto, este parâmetro foi aplicado nas análises das transições de regime em leito de jorro, que exibem sinais aleatórios em leito fixo e sinais periódicos em leito de jorro estável.

Na Região A da Figura **1c**, temos o fenômeno de leito fixo, onde há a preponderância dos sub-sinais D4 (25 a 12,5 Hz) e da faixa D6 a D10 (0,195 a 3,125 Hz), distribuindo-se de forma mais homogênea nestas várias faixas de frequência, o que refletiu em maiores valores da entropia *wavelet* de Shannon, variando de 1,6 a 1,8 bits. Os sinais desta região foram analisados e observou-se considerável aleatoriedade das flutuações de pressão, elevando os valores de entropia. Essa

tendência se mantém por toda a região que compreende o leito fixo.

A Região B da Figura **1c** compreende na curva fluidodinâmica de ida às tentativas de consolidar o regime de jorro no leito, desde a formação do jorro interno até o jorro estável. Entretanto, devido ao comportamento fluidodinâmico caótico que o leito sofre durante esta fase de transição de regime, em muitos momentos os sinais são difíceis de serem interpretados pelos sub-sinais de detalhes, refletindo em valores bem baixos da entropia *wavelet* de Shannon. Quando posteriormente os sinais se estabilizam com relativa periodicidade característica do regime de jorro interno, os valores entropia *wavelet* de Shannon sobem novamente, devido especialmente ao aumento do conteúdo de energia em D5 (6,25 a 12,5 Hz). Lungu *et al.* (2019) estudaram transições de regimes de fluidização empregando transformada Hilbert-Huang em sinais de flutuação de pressão e avaliaram as transições fluidodinâmicas usando um conceito similar a entropia *wavelet* de Shannon. Os autores reportaram que mínimos bem localizados na entropia são indicativos de reorganização nas estruturas energéticas, que são tipicamente correlacionadas com transições de regime fluidodinâmicos. Esse comportamento da entropia tendendo a um valor mínimo, foi observado em dois pontos bem específicos, sendo eles, momentos antes da formação do jorro interno ( $\sim 0,225$  m/s) e momentos antes da estabilização do jorro ( $\sim 0,30$  m/s), mostrando a robustez e viabilidade do uso desta variável na identificação de transição de regimes fluidodinâmicos para um leito de jorro.

Finalmente, na Região C da Figura **1c** observou-se que com o aumento da velocidade, temos a diminuição gradual da entropia *wavelet* de Shannon, mostrando que os sinais processados estão encaminhando-se para uma informação cada vez mais organizada, periódica e de monofrequência, concentrada na faixa de energia do sub-sinal D5 (6,25 a 12,5 Hz).

Na Figura **1d**, está disposta a evolução do índice de homogeneidade do jorro em função do aumento da velocidade do ar. Na Região A da Figura **1d**, temos os menores patamares para o índice de homogeneidade, uma vez que tanto a micro e macroescala são dominantes nesta

fase, isto produziu um baixo índice, que em grande parte não chega a atingir o fator entre 10 a 30 vezes a relação entre as grandes e pequenas escalas do leito. Na Região B da Figura 1d, quando a velocidade se aproxima de 0,225 m/s, nota-se que o índice de homogeneidade apresenta máximos locais, que podem ser entendidos como os momentos iniciais de mudança de regime, ocasionados pela elevada magnitude da razão de energia da macroescala (Figura 1b). Picos nas proximidades 0,23 e 0,30 m/s são observados, quando jorro interno e mínimo jorro são formados, respectivamente. Observando-se a Região C da Figura 1d, uma vez que nesta fase o regime cíclico de jorro foi estabelecido e houve a transferência de energia da macro para a mesoescala, o índice de homogeneidade a aumenta linearmente até atingir um patamar aproximadamente constante por volta da magnitude de 40, com o aumento da velocidade do ar (ver Figura 1d, ampliação).

De maneira geral, pôde-se perceber que o parâmetro do índice de homogeneidade, conseguiu ser sensível às modificações de regime experimentadas pelo leito de jorro durante o aumento da velocidade do ar. Foi possível ser mais assertivo na transição dos regimes de leito fixo para jorro interno e de jorro interno para leito de jorro estável, devido aos máximos locais apresentados.

Para o ensaio fluidodinâmico 1 referente a redução de velocidade do ar (curva de volta), analisaremos as Figuras 2a, 2b e 2c. É importante ressaltar a inversão do eixo da velocidade do ar nas figuras referentes a curva de volta, em relação a análise anterior da curva de ida. Por se tratar do mesmo ensaio fluidodinâmico, as subdivisões em regiões de faixas de velocidade C, B e A foram as mesmas da análise anterior e ainda assim foi possível observar semelhanças nos comportamentos das razões de energia das escalas, entropia *wavelet* de Shannon e índice de homogeneidade.

De forma semelhante ao perfil observado para a curva de ida, temos na Figura 2a a evolução das estruturas de escala para a velocidade decrescente (curva de volta). O começo do ensaio se dá com o regime de jorro estável consolidado no leito, onde a mesoescala prepondera sobre a macroescala (região C). Nesta fase, as características dos sinais originais coincidem com o sub-sinal D5 e o

movimento das partículas é cíclico e intenso. Nota-se que à medida que ocorre a diminuição da velocidade, a taxa de movimentação de partículas diminui até o cessar da fonte, que é evidenciado por um pico próximo de 100% na macroestrutura, devido às maiores amplitudes de pressão presentes nos sinais na região do mínimo jorro. A Região B possui características que são diferentes da curva de ida, uma vez em que o jorro interno se estende por uma faixa de velocidades muito mais ampla, em função do rompimento da barreira de compactação na estrutura sólida do leito. Foi possível notar a importante concentração das parcelas de conteúdo energético dos sinais na mesoescala e macroescala, principalmente entre 0,30 e 0,225 m/s, onde estas escalas apresentam magnitudes energéticas muito semelhantes, devido ao movimento intenso do gás e das partículas na região do ânulo. Ao atingir velocidades cada vez mais baixas, o sistema volta a apresentar a estrutura compacta do leito fixo na região A, onde se preponderam as componentes referentes ao ruído e interações partícula-partícula (microescala) e às baixas frequências que estão presentes em todo o ensaio, referindo-se ao escoamento do ar pelo leito fixo e pela coluna.

Na Figura 2b é mostrada a evolução da entropia *wavelet* de Shannon para a curva de volta. Uma vez em que o jorro estável se mostra um fenômeno de monofrequência, grande parte da energia dos sinais está concentrada no sub-sinal D5, fazendo com que a magnitude da entropia alcance valores baixos, quando comparadas ao regime de leito fixo e jorro interno, como se poder ver pela Figura 2b na região C. Deste modo, nota-se que a entropia aumenta com a diminuição da velocidade, até apresentar um mínimo local bem acentuado, que indica a reconstrução das estruturas de escala no leito, momento em que a velocidade de mínimo jorro pode ser detectada e confirmada experimentalmente por Butzge (2012). Para a Região B da Figura 2b, onde tem-se o regime de jorro interno preponderante, a entropia *wavelet* de Shannon se estabiliza em um patamar um pouco mais elevado, acima de 1,2 bits. Percebemos uma ampla faixa de coincidências entre os valores de entropia em jorro estável e jorro interno, isto se deve as características semelhantes dos sinais, pois em

ambos os casos, os sinais guardam informações de periodicidade. Finalmente, a transição da Região B, de jorro interno, para a Região A, de leito fixo, ocorre de forma suave, sem ponto mínimo local, como foi tipicamente notado neste parâmetro para a curva de ida. Porém infere-se na Figura 2c um aumento do

parâmetro para o maior patamar observado para esta variável em todo o ensaio (acima de 1,6 bits, seguindo a linha *smooth*). Uma explicação para este fato decorre de que os sinais de queda de pressão em leito fixo são muito aleatórios e possuem diversas componentes de frequência em sua estrutura energética.

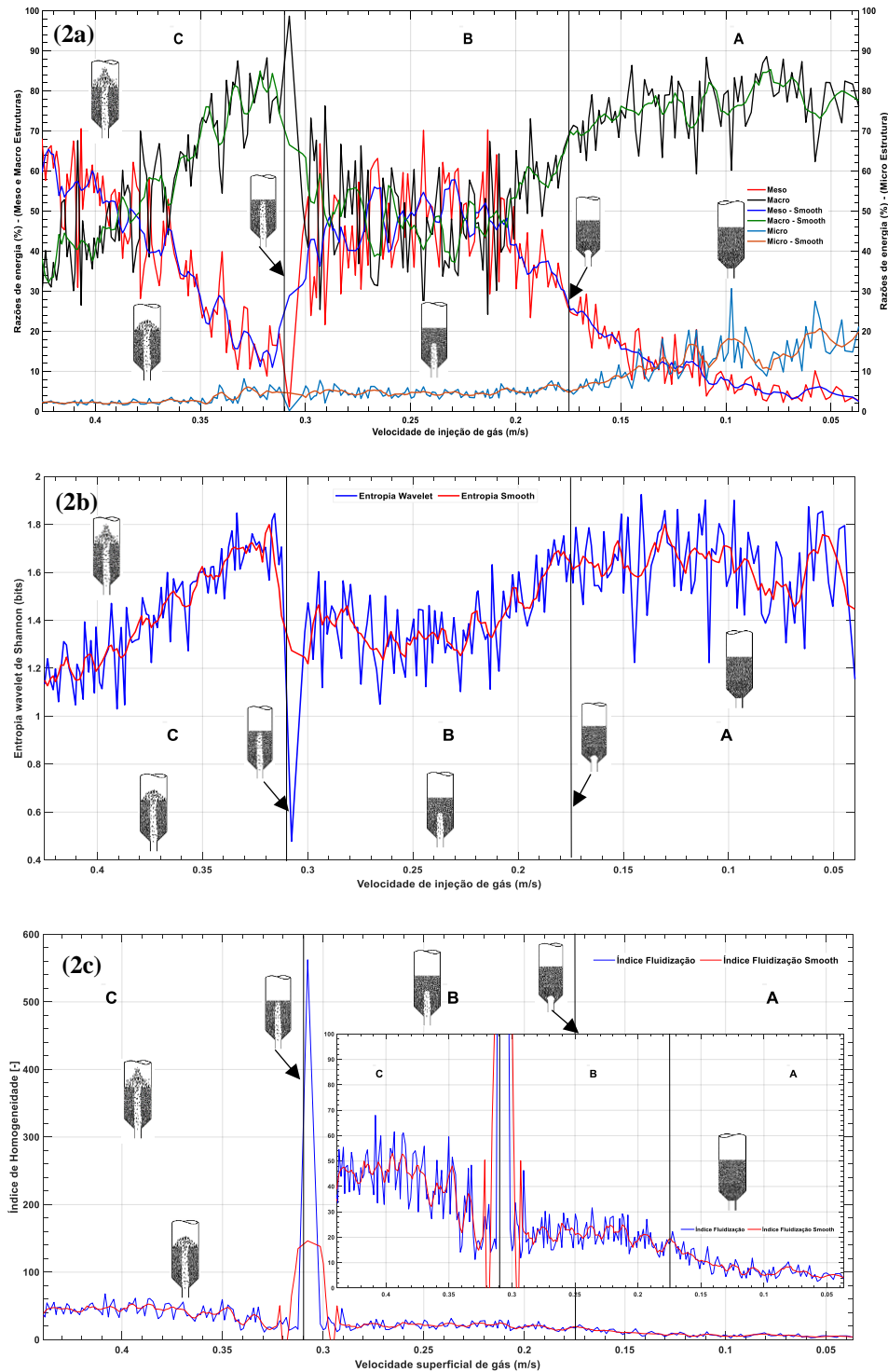


Figura 2: (a) Razão de energias das escalas. (b) Entropia *wavelet* de Shannon. (b) Índice de Homogeneização.

A partir da análise do índice de homogeneidade, foi possível inferir a viabilidade de seu uso para a detecção da velocidade de mínimo jorro. Quando a velocidade alcançou o valor de 0,31 m/s, ocorreu um máximo local na evolução do índice e este valor de velocidade foi concordante com a reportado por Butzge (2012). Novamente, a Região C da Figura 2c é a que possui o maior patamar do índice dentre os regimes fluidodinâmicos, visto que a energia dos sinais está majoritariamente localizada na macro e mesoescalas. O índice de homogeneidade reduziu gradualmente seu valor por causa do decréscimo da mesoescala na Região B e retornou para a condição de jorro interno, porém mantendo-se em um patamar entre 20 e 30, indicando a presença de movimentação das partículas na região anular do leito. O comportamento deste índice frente as mudanças energéticas características dos sinais de leito fixo (região A da Figura 2c) refletiu em uma redução de sua magnitude para o menor patamar do ensaio, chegando a apresentar valores abaixo de 10. Portanto, de maneira geral, este índice caracterizou de forma bem evidente as mudanças de regime ocorridas, sendo possível diferenciar regime de jorro estável de leito fixo, jorro interno de leito fixo. No entanto, em uma certa faixa de velocidade não foi possível diferenciar jorro interno de jorro estável, devido às escalas macro e meso serem competitivas no regime jorro interno, isto é, apresentando patamares de energia muito próximos.

### Ensaio 2 (m = 1,5 kg)

Aumentando-se a velocidade do ar até aproximadamente 0,19 m/s, região A da Figura 3a, as partículas mantiveram-se em leito fixo, uma vez em que a velocidade do gás foi insuficiente para promover o movimento. É conhecido que o aumento na carga do leito produz um aumento da queda de pressão necessitando de maior velocidade para promover alterações fluidodinâmicas. O comportamento linear da queda de pressão é característico do regime de leito fixo. A Região B da Figura 3a abrange a faixa de velocidades

de injeção de gás entre 0,19 a 0,36 m/s, que compreende a formação do arco interno e as inúmeras tentativas de formação do jorro, com desmoronamentos subsequentes do leito de partículas, em função da velocidade do ar ser insuficiente para estabilizar a fonte e promover o movimento ordenado das partículas. Após o maior decréscimo da queda de pressão do leito (observa-se maiores espaços vazios entre os pontos de pressão), tem-se entre 0,28 a 0,36 m/s a presença do jorro interno na operação do processo. Na Região C na Figura 3a ocorreu a estabilização do jorro devido a velocidade do ar suficientemente elevada, que promoveu a intensificação do movimento cíclico das partículas, fazendo com que a queda de pressão sofresse um ligeiro aumento conforme a velocidade aumentou. A grande diferença em relação aos regimes experimentados reduzindo a velocidade do ar, é que o jorro interno é formado sem o mesmo obstáculo inicial. As mudanças em termos de queda de pressão são muito sutis (Figura 3a). Diferentemente do que ocorre no domínio da transformada wavelet.

Analisando-se a Figura 3b região A acerca das estruturas de escala, os sinais provenientes do leito fixo produziram um patamar de energia em macroescala acima de 70%, microescala entre 10 e 30%, mesoescala menor que 4%, que foram muito semelhantes as condições para a massa de 1,0 kg de partículas. A identificação do leito fixo pela análise das escalas mostrou-se reproduzível. A formação e consolidação do regime de jorro interno é mostrada na região B da Figura 3b. A descompactação do leito produz sinais de pressão muito complexos e a escala de energia que mais se ajusta aos sinais originados estão ligados a macroescala, isto é, ao conteúdo de baixa frequência. A macroescala chega atingir valores próximos de 100% do conteúdo energético. Em 0,25 m/s tem-se a fase mais intensa de desmoronamentos do leito. Quando o regime de jorro interno se consolida em aproximadamente 0,27 m/s, começa ocorrer a transferência de energia mais intensa da macro para a mesoescala, isto é, do fluido para a partícula.



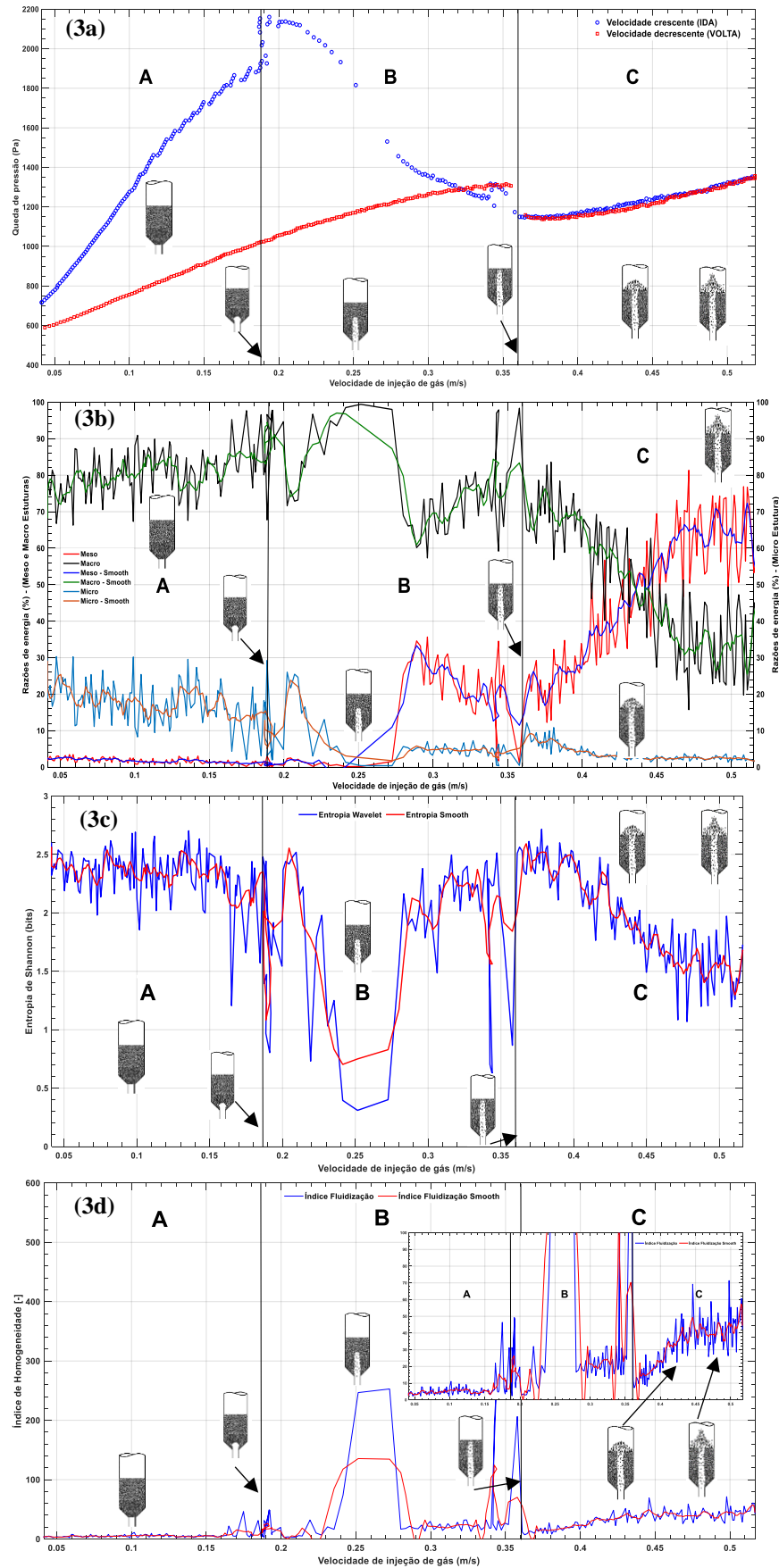


Figura 3: (a) Curva fluidodinâmica. (b) Razão de energias das escalas. (c) Entropia wavelet de Shannon. (d) Índice de Homogeneização.

Nesta fase, os sinais subsequentes a 0,25 m/s começam a apresentar um comportamento dinâmico com maior característica de periodicidade, o que acarretou um aumento da mesoescala durante o regime de jorro interno, pois a circulação de partículas, mesmo baixa, ocorre de forma cíclica. No momento do mínimo jorro, em 0,36 m/s, ocorreu novamente o fenômeno da reconstrução energética do sistema, apresentando exatamente neste ponto máxima macroescala e mínima mesoescala. Observando-se a região C da Figura 3b, temos a consolidação gradual do regime de jorro estável, que se encaminha para a estabilização a partir de 0,46 m/s, com o aumento mais expressivo da velocidade do ar. Finalmente, quando o jorro estável se instala no leito, a mesoescala cresce de forma considerável conforme aumenta-se a velocidade de ar. A partir de 0,43 m/s as interações partícula-fluido dominantes se sobressaem às interações partícula-partícula e o patamar de energia da mesoescala se estabiliza entre 60 e 70% do conteúdo energético por um período mais longo de ensaio que ao analisado com 1,0 kg.

A análise da entropia *wavelet* de Shannon e do índice de homogeneização para o ensaio 2 foi realizada de forma semelhante ao ensaio 1, sendo que estes parâmetros complementam a detecção das transições de regime.

De forma geral, ambos os parâmetros se mostraram reprodutíveis quando comparados ao ensaio 1. A Região A da Figura 3c apresentou os maiores valores para a entropia, devido a ampla dispersão energética em vários sub-sinais, ocasionada pela distribuição aleatória das amplitudes dos sinais de pressão. Em relação a Região A da Figura 3d, observou-se o menor patamar para o índice de homogeneização, em função da presença da microescala em baixas velocidades, respectivamente. Na Região B das Figuras 3c e 3d, tanto a entropia quanto índice foram assertivos na detecção da reconstrução energética dos regimes mais importantes do ensaio. A descompactação do leito e formação do jorro interno provocam um valor mínimo de entropia e máximo de índice de homogeneidade, devido à pressão muito intensa da macroescala, em 0,25 m/s. Por volta, de 0,36 m/s, novas quedas e subidas, foram experimentadas por entropia e índice de

homogeneidade, confirmando a região de jorro mínimo, respectivamente. Finalmente, quando o jorro estável se estabeleceu no leito, conforme a velocidade do ar aumentou, a mesoescala intensificou-se fortemente devido a concentração de energia em apenas uma faixa de frequência. Nesta fase, como se pode ver pela região C das Figuras 3c e 3d, a entropia e o índice reduzem e aumentam seus patamares gradualmente, até que se estabilizam, respectivamente. Para o ensaio 2, valores de entropia abaixo de 2,0 bits e índice de homogeneidade entre 30 e 50, mostraram o regime de jorro estável, sendo este último parâmetro reprodutível em ambas as massas de sólidos.

Analisando-se o comportamento da curva de volta para o ensaio 2 (Figuras 4a, 4b e 4c), percebe-se grandes semelhanças em relação ao ensaio 1, quanto a evolução das variáveis obtidas pela transformada wavelet. As razões de energia da mesoescala iniciaram em um patamar semelhante ao da curva de ida (60 a 70%) e reduziram gradativamente conforme a velocidade diminuiu até que houve a extinção da fonte do jorro, momento em que a macroescala atingiu um máximo de aproximadamente 100% (região C da Figura 4a). Isto ocorreu devido a transferência de energia paulatina da meso para a macroescala, o que indicou no ponto de velocidade de 0,36 m/s, a reconstrução energética do sistema, culminando com a formação jorro interno ou do mínimo jorro. Toda a extensão da região B da Figura 4a exibe a transferência de energia progressiva do conteúdo de alta frequência dos sinais, relacionado ao movimento intenso e circular do jorro, para o conteúdo de baixa frequência, ligado ao escoamento do ar no canal central e a circulação das partículas e do ar pela região anular. À medida que a velocidade foi reduzida, o movimento das partículas tornou-se menos intenso, favorecendo o efeito de baixa frequência. Na Região A da Figura 4a infere-se que a microescala apresentou um ligeiro aumento em baixas velocidades, juntamente com a preponderância da macroescala sobre a mesoescala. Novamente a formação do leito foi detectada em valores de razão de energia acima de 70% e entre 10 e 20% para macro e mesoescala, respectivamente.

Baixos patamares de entropia *wavelet* de Shannon, menores que 2,0 bits, e índice de homogeneização acima 30, caracterizam o regime de jorro estável, como se pode ver pela região C das Figuras 4b e 4c. Esta condição de fluidodinâmica é excelente para a intensificação das trocas de calor e massa e do eficiente desempenho de operações de secagem, recobrimento ou aglomeração realizadas neste equipamento. A condição de jorro mínimo (0,36 m/s) é assertivamente identificada pelos valores mínimo e máximo localizados na entropia e no índice de

homogeneidade, na fronteira entre as regiões C e B, das Figuras 4b e 4c. Comportamento similar também foi observado para o ensaio 1. Entretanto, para valores abaixo do jorro mínimo a entropia praticamente não sofre mais alteração, apresentando ligeiro aumento na condição de leito fixo. Em relação o índice de homogeneidade do jorro, este mais uma vez mostrou-se reprodutível, com relação ao ensaio 1, pois valores entre 10 e 30, podem indicar o regime de jorro interno e mais precisamente, abaixo de 10, o regime de leito fixo.

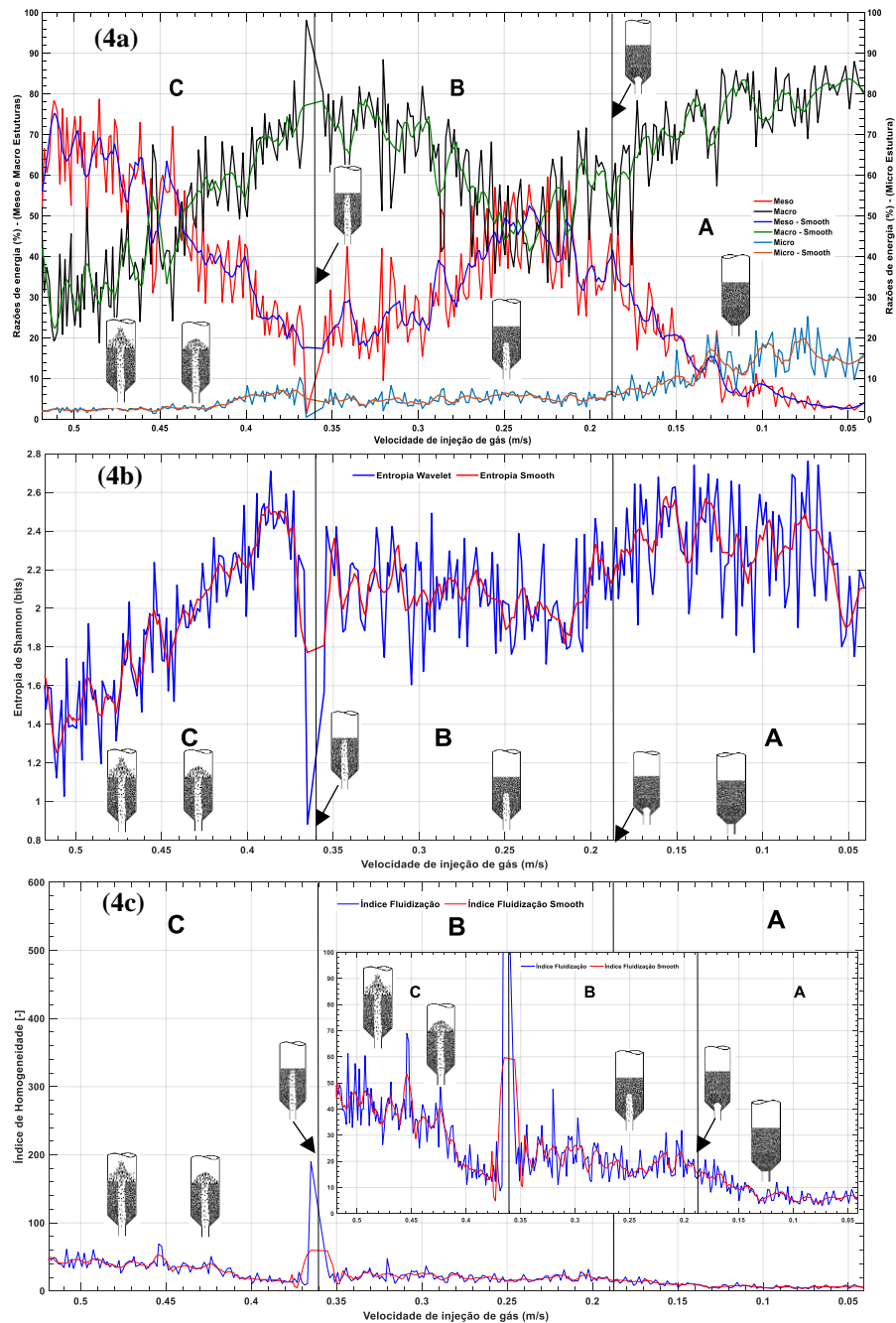


Figura 4: (a) Razão de energias das escalas. (b) Entropia wavelet de Shannon. (c) Índice de Homogeneização

## CONCLUSÕES

Neste trabalho foi possível confirmar a viabilidade de implementação da análise *wavelet* para o monitoramento de regimes fluidodinâmicos em um leito de jorro, pois os resultados obtidos mostraram-se concordantes com as mudanças observadas na curva fluidodinâmica tradicional. A entropia *wavelet* de Shannon mostrou ser um parâmetro robusto para detectar a velocidade em que ocorrem as reorganizações de regime, principalmente o mínimo jorro. O índice de homogeneidade mostrou ser eficiente na identificação de todos os regimes do leito. Cada faixa de índice informa a contribuição de cada escala para o movimento de jorro. Índices acima de 30 caracterizam o jorro estável. Entre 10 e 30, observamos o jorro interno e abaixo 10 o leito fixo. Este trabalho mostrou um grande potencial para aplicações futuras de análise *wavelet* para o monitoramento de regimes em leito de jorro.

## REFERÊNCIAS

- BUTZGE, J. J. (2012) Controle do regime fluidodinâmico estável durante o processo de umedecimento de inertes em leito de jorro utilizando análise espectral. Universidade Estadual de Campinas – Campinas – SP, 129p.
- EPSTEIN, N; GRACE, J. R. (2011) Spouted and Spout-Fluid Beds Fundamentals and Applications. New York: Cambridge University Press.
- FREY, G. M. (2005) Multiresolutional partial least squares and principal component analysis of fluidized bed drying. University of Saskatchewan.
- JIANG, H; CHEN, H; WANG, Y; WU, Z; GAO, J; YANG, X. (2012). Wavelet based analysis of pressure fluctuation signals measured from a wind cap in bubbling fluidized bed. 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. IEEE, p. 1434-1438.
- LI, J. (2000). Compromise and resolution—exploring the multi-scale nature of gas–solid fluidization. Powder Technology, Vol 111, p. 50-59.
- LUNGU, M; SIAME, J; SUN, J; MUKOSHA, L; WANG, J; YANG, Y. (2019). Characterization of Fluidization Regimes and Their Transition in Gas–Solid Fluidization by Hilbert–Huang Transform. Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol 59, p. 883-896.
- MACHADO, V. S. S; BUTZGE, J. J; SILVA, C. A. M da. (2021). Análise Wavelet Nas Transições De Regime Em Leito De Jorro. Anais do I Web Encontro Nacional de Engenharia Química. Diamantina – MG, online.
- MALLAT, S. G. (1989) A Theory for Multiresolution Signal Decomposition, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol 11(7), p. 674–693.
- RÓDENAS, J; GARCIA, M; ALCARAZ, R; RIETA, J. J. (2015). *Wavelet* entropy automatically detects episodes of atrial fibrillation from single-lead electrocardiograms. Entropy, Vol 17, p. 6179-6199.
- SUN, J; YAN, Y. (2016) Non-intrusive measurement and hydrodynamics characterization of gas-solid fluidized beds: A review, Measurement Science and Technology. IOP Publishing, Vol. 27(11), p. 112001.
- YANG, T. Y; LEU, L. P. (2008), Study of transition velocities from bubbling to turbulent fluidization by statistic and wavelet multi-resolution analysis on absolute pressure fluctuations. Chemical Engineering Science, Vol 63, p. 1950-1970.
- YANG, Q; WANG, J. (2015), Multi-level wavelet shannon entropy-based method for single-sensor fault location. Entropy, v. 17, p. 7101-7117.
- ZHAO, G. B; YANG, Y. R. (2003), Multiscale resolution of fluidized-bed pressure fluctuations. AIChE Journal, Vol 49, p. 869-882.