



GRUPO 2

GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT

NOVA ABORDAGEM PARA CONTROLE DE REGIME DE LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE ATRAVÉS DE ANÁLISE NÃO-LINEAR

David Fiorillo
Empresa Capixaba de Soluções em Eficiência Energética – ECSEE

RESUMO

A importância do controle automático de regimes de fluidização em sistemas fluidizados, reside em manter controlado o grau de interação fluido-partícula, favorecendo reações químicas, e contribuindo para a continuidade operacional desses processos. A instrumentação aplicada para quantificação de regimes de fluidização em colunas de leito fluidizado circulante ora apresenta pouca relevância para o auxílio operacional ora possui custo elevado para aplicação. O presente trabalho apresenta solução, de baixo custo, para caracterização dos regimes de fluidização, através de análise não-linear de séries temporais dos sinais de pressão estática. Um experimento de fluidização, testa diferentes tipos de partículas e diferentes regimes de fluidização, onde o sinal de pressão estática coletado, em diferentes posições da coluna, passa por um processo de quantificação baseado em invariantes do caos. Este robusto método de caracterização, permite que operadores possam controlar este processo nas mais variadas aplicações.

PALAVRAS-CHAVE

interação fluido-partícula, fluidização, fluido-dinâmica, quantificação de regimes de fluidização, sistema não-linear espaço-temporal

1.0 - INTRODUÇÃO

Avaliações recentes confirmam antigas inquietações relacionadas com o aquecimento global, formação de chuva ácida, qualidade do ar, gestão de recursos não-renováveis e etc. Cada um destes temas está relacionado com a forma como usamos a energia, culminando numa reavaliação global do uso de combustíveis fósseis [1]. Aproximadamente 72% da energia elétrica global é gerada a partir de processos de combustão. A geração elétrica por combustão é razoavelmente eficiente e bem conhecida, com alta disponibilidade (termelétricas) e de baixo custo, mas altamente emissora [2]. Reduzir as emissões sem desacelerar o crescimento, é uma tarefa desafiadora.

A operação de sistemas de leito fluidizado tornou-se amplamente útil, durante a última década, através dos combustores, principalmente devido às suas vantagens ambientais (controle direto através de aditivos) e sua capacidade de queimar diferentes tipos de combustíveis. O leito fluidizado tornou a geração de calor mais simples por que permitiu o controle das emissões, através de aditivos, retirando lavadores de gases (*wet scrubber*) do processo global. A necessidade de operar combustores de leito fluidizado circulante com controle de temperatura reside na manutenção de limites de temperatura, na compensação automática de distúrbios, provocados, principalmente, pela heterogeneidade do combustível.

Este trabalho contribui para sequência de estudos pertinentes ao mapeamento de regimes de fluidização explorando como determinada invariante do caos evolui aos regimes de fluidização. Sinais coletados em diferentes alturas de uma coluna de leito fluidizado circulante produzem séries temporais, que são quantificadas a partir de uma invariante do caos, a entropia de Kolmogorov. Esta análise não-linear permite avaliar propriedades invariantes da interação fluido-partícula local, quantificando os regimes de fluidização em diferentes posições da coluna, a partir do sinal de flutuação da pressão estática. O baixo custo, a facilidade de instalação e compatibilização às colunas industriais

quentes são razões que beneficiam esta proposta. O diferencial desta metodologia, é levar em conta o problema espaço-temporal intrínsecos de sistemas de leito fluidizado circulante. O estudo do controle de regime (quantificação da interação fluido-partícula numa coluna) pode contribuir com o aumento da eficiência global de processos de gaseificação, através de operação de controle automático de regime de fluidização.

2.0 - CONCEITOS E FUNDAMENTOS

Os conceitos e fundamento necessários estão divididos em três partes. A primeira parte é pertinente aos sistemas fluidizados, abordando suas definições dos estados de fluidização e seus mecanismos. A segunda parte aborda alguns fundamentos para aquisição de dados com redução de ruído, enquanto a terceira parte aborda os fundamentos para aplicação de análises não-linear em séries temporais para quantificação baseada em invariante do caos.

2.1 Sistemas fluidizados

Sistemas fluidizados, em geral, possuem vantagem natural de terem altas taxas de transferência de massa e calor. Desde a década de 80, a tecnologia de sistemas fluidizados está comercialmente presente em aplicações de limpeza, mistura, recobrimento, granulação, secagem, pirólise, gaseificação, combustão, entre outros. Cada uma destas aplicações, deve operar em diferentes regimes de fluidização, de forma a maximizar a transferência de calor, massa, favorecendo as condições para determinadas reações químicas (como em pirólise, gaseificação e combustão). A existência de múltiplos padrões de regime de escoamento em sistemas de leitos fluidizado é motivação para muitos cientistas trabalharem na busca de abordagem unificada [3].

Por outro lado, pesquisas envolvendo o comportamento caótico de sinais macroscópicas (pressão estática, diferencial, temperatura, etc.) de leitos fluidizados, tem crescido consideravelmente [4] [5]. Diferente da abordagem anterior, esta linha de pesquisa tem fornecido bons resultados para quantificação dos regimes de fluidização através do cálculo de invariantes do caos.

Abordagens mais modernas para caracterização dos regimes de fluidização estão tendendo a avaliar características invariantes do caos de sinais de macro-escala, como a medição de pressões estática e diferenciais, devido as suas facilidades de medição direta (compatível com sistemas comerciais), e pouca dependência da escala das colunas ensaiadas.

Em laboratórios, colunas de fluidização fria e transparentes tem a função de permitir que um operador ajuste condições de alimentação de ar e partículas, para operar num determinado regime. Essa forma de operação é inviável em colunas industriais quentes. A Figura 1, apresenta em (a) a condição de uma coluna industrial pré-aquecida com leito de partículas misturadas (areia e combustível). Em (b), a injeção de ar ascendente que conduzindo o leito para algum regime de fluidização. E em (c), a visão real obtida pelo operador, motivando pesquisas que auxiliem a reconstrução do estado de fluidização de um LFC quente.

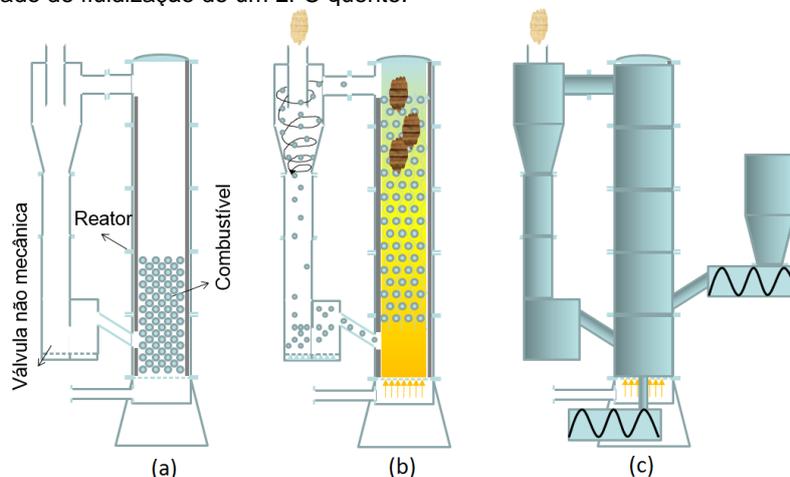


Figura 1 - Infógrafa do problema da coluna opaca de gaseificação em leito fluidizado circulante.

É comum registrar flutuações nas séries temporais de pressão estática ou diferencial durante uma operação de leito fluidizado circulante devido a interação fluido-partícula. Através da coleta do sinal de flutuação de pressão de uma coluna de leito fluidizado real, torna-se complexa a tarefa do operador inferir quanto o regime de fluidização corrente ou sua mudança. Atualmente, visores, localizado ao longo da coluna, auxiliam na confirmação dos regimes de fluidização. Contudo, não foi tão simples distinguir, qualitativamente, entre os regimes globais turbulento, rápido e de transporte, a partir de visores locais da unidade ensaiada. Portanto, diferenciar regimes de fluidização a partir da análise de flutuações locais é um problema de engenharia.

Em plantas reais, o operador se depara com séries temporais de flutuações de pressão estática onde parâmetros estatísticos de média e desvio-padrão não são suficientes para distinção precisa dos estados de fluidização.

2.2 Aquisição de séries temporais ruidosas

A aplicação de ferramentas de análise da dinâmica de sistemas está ligada com a escolha adequada dos sensores, cabeamento (transmissão de sinais) e sistemas de aquisição dados (DAq, *Data Acquisition*) e aplicação computacionais para organização de dados e escrita em arquivos.

Para o correto ajuste do DAq é necessário conhecer os tipos de fontes de sinais, que podem ser fontes de sinais flutuantes ou referenciadas à terra. A referência de terra de um sinal flutuante deve ser o terra do dispositivo para estabelecimento de uma referência local, caso contrário, o sinal medido apresentará variações, se a fonte flutuar e sair da faixa de entrada do modo comum.

Medidas corretas são cruciais para análise de experimentos. Não importa qual sensor utilizado, muitos parâmetros podem interferir, tais como a temperatura, a pressão, restrições mecânicas e ambiente eletromagnético podem contribuir para o erro de medição. Esses tipos de problema são intrínsecos aos sensores.

Dispositivos eletrônicos estão sujeitos a fontes de ruído externas (campo da compatibilidade eletromagnética estuda essas fontes) e fontes de ruído internos causados por variações de tensão e pelos próprios correntes de circuito [6]. As fontes de ruídos internos ou problema do ruído eletrônico são causadas, em sua maioria, devido as características de componentes eletrônicos (não linearidades, efeitos térmicos, etc.) e circuitos como os amplificadores operacionais. A média móvel é um dos filtros mais comuns, principalmente porque é o filtro digital mais simples de compreender e utilizar. Apesar de sua simplicidade, o filtro de média móvel é ideal para uma tarefa comum: reduzir o ruído aleatório, mantendo uma boa resposta ao degrau [7].

O filtro de média móvel opera com média do número de pontos do sinal de entrada para produzir cada ponto no sinal de saída conforme a Equação 1.

$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i-j] \quad \text{Equação 1}$$

A quantidade de redução de ruído pode alcançar a raiz quadrada do número de pontos da média móvel [7]. Estudos de números de pontos de média móvel podem indicar a relação ótima entre a redução de ruído e o atraso do sinal reconstruído.

A filtragem digital de média móvel evidencia ainda mais a relação S/R (sinal/ruído) da dinâmica de um sistema, quando associados a instrumentação, transmissão e aquisição de dados, adequadamente blindados e isolados.

2.3 Análise não-linear baseado na entropia de Kolmogorov

A análise não-linear tem se tornado uma poderosa ferramenta para caracterização quantitativa de sistemas não-lineares complexos, como os fluidizados. Tais ferramentas podem auxiliar escalonamentos unidades laboratoriais e até o projeto de sistemas de controle. Dentre os diversos comportamentos caóticos de sinais observáveis em sistemas fluidizados, este trabalho analisa as flutuações de sinais de pressão estática [8].

Classificar os sistemas dinâmicos observados é uma parte crítica da análise de séries temporais. Quando a fonte dos sinais é linear, convencionalmente, picos do espectro de Fourier em alguma frequência, são utilizados para uma caracterização. Neste tipo de sistema, o estímulo do sistema em qualquer instante com diferentes excitações de entrada, promoveriam diferentes intensidades do pico característico, no espectro de Fourier, mas na mesma frequência. Nesta análise, o espectro de Fourier fornece uma invariante ao movimento do sistema linear. A fase associada à frequência, depende das condições de medição, enquanto a magnitude o pico, depende da intensidade da excitação de entrada [8].

Conforme Grassberger et al. [9] a entropia de Kolmogorov ou Kolmogorov-Sinai, num sistema dinâmico com três graus de liberdade (por exemplo), repartido num espaço de fase de três dimensões em caixas de tamanho ϵ^3 com um atrator de trajetória $X(t)$, pode ser definida como o somatório do produto de probabilidades conjuntas em sequências de caixas i_d , medido em intervalos de tempo, τ . A probabilidade $p(i_1, i_2, \dots, i_d)$ é a probabilidade conjunta que $X(t = 1\tau)$ estar na caixa i_1 (no espaço de fase), $X(t = 2\tau)$ estar na caixa i_2, \dots , $X(t = d\tau)$ na caixa i_d . A entropia Kolmogorov é definida pela Equação 2.

$$K = - \lim_{\tau \rightarrow 0} \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \lim_{d \rightarrow \infty} \frac{1}{d\tau} \sum_{i_1, \dots, i_d} p(i_1, \dots, i_d) \times \ln(p(i_1, \dots, i_d)) \quad \text{Equação 2}$$

Em situações experimentais, é comum no estudo de sistemas dinâmicos a aquisição de sinais unidimensionais. Metodologias, como a aplicação do teorema de Takens, permitem a reconstrução do espaço de fase baseado em séries unidimensionais.

Quando o sistema é totalmente conhecido, $K = 0$. Para $K \rightarrow \infty$, o sistema dinâmico é dito ser aleatório ou estocástico. Mas para K finito, constante e diferente de zero, o sistema dinâmico é dito ser caótico determinístico. Neste caso, o horizonte de previsão depende do valor da entropia. Para os modelos definidos analiticamente é mais simples estimar K a partir das equações da tangente (ou variacional) que descrevem a evolução da distância entre dois pontos (infinitesimalmente próximos). Mas é muito difícil determinar o K diretamente a partir de uma série temporal medida. A entropia é uma medida bem conhecida e utilizada para quantificar o grau de desordem num sistema dinâmico. Também tem sido associada com a perda de informação ao longo de um atrator.

3.0 - PROPOSTA DE BANCADA

Os primeiros estudos de quantificação de regimes de fluidização a partir de séries temporais de sinais de flutuação, avaliaram a amplitude e frequência do sinal resultante, para tentar reconstruir o comportamento da coluna LFC. Seus resultados confirmaram que a presença de diferentes características de sólidos, pode ser quantificada proporcionalmente ao padrão de escoamento desempenhado. Contudo, a escala da coluna (laboratorial a industrial) e a quantificação convencional, a partir de um único ponto de medida, pode resultar algumas inconsistências. A primeira inconsistência da quantificação convencional dos regimes de fluidização, encontra-se em avaliar o regime global de uma coluna com apenas uma medição. O problema de fluidização numa coluna LFC trata de um problema não-linear espaço-temporal, onde diversas medidas são necessárias para caracterizar os estados ou regimes de fluidização.

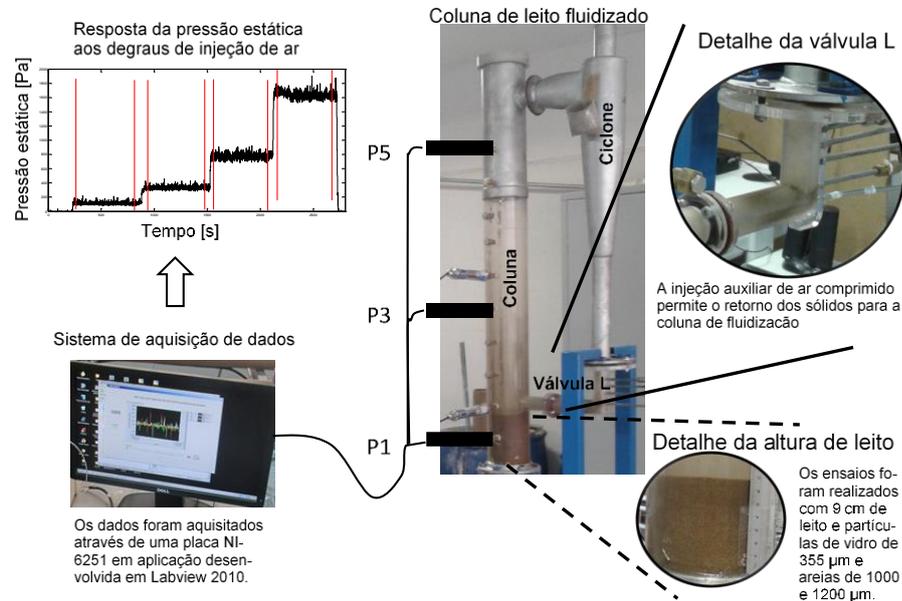


Figura 2 - Proposta de metodologia experimental para quantificação de regimes de fluidização em coluna LFC.

A quantificação de sistema dinâmico através de parâmetros variantes à sua escala, necessitará de um procedimento de calibração para cada tipo de coluna, identificando os mínimos e máximos.

Esta proposta de quantificação visa contribuir para solução das inconsistências apresentadas realizando mais de uma medida e avaliação do sinal de pressão por invariantes do caos. Em termos de evolução axial de algumas invariantes do caos, foram identificadas três regiões características: a base, o meio e o topo. Quanto aos tipos de invariantes do caos, foram testadas a entropia de Kolmogorov, a dimensão de correlação e o expoente de Hurst.

A Figura 2, apresenta a nova metodologia experimental para quantificação de regimes de fluidização em coluna LFC. A coluna LFC é preenchida com 8 cm de leito com diferentes tipos de sólidos: areia 1,0 mm, areia 1,2 mm e partículas de vidro 0,355 mm. Com leito na coluna, um ventilador sopra ar com diversos fluxos, através do leito de partículas, desempenhando os regimes de fluidização. Para estudar um determinado regime, a rotação do ventilador é fixada e controlada através de um inversor de frequência. O regime de fluidização deve ser desempenhado por um determinado período, para que o sistema de aquisição de dados registre a série temporal no tamanho adequado. A quantidade de amostras da série temporal permite avaliar a incerteza das estimativas das invariantes do caos.

A medida que os regimes de fluidização são desempenhados, diferentes fluxos de materiais arrastados são impostos a coluna, influenciando consideravelmente na redução do inventário de massa. Quando o arrasto começa a reduzir, significativamente, o inventário, a malha de circulação deve ser acionada através da injeção de ar lateral da válvula L (vide detalhe na Figura 2), para empurrar os sólidos de volta para coluna.

Para garantir que cada tipo de partícula desenvolva o mesmo tipo de escoamento, cada regime de fluidização experimental deve ser fixado com base nas descrições qualitativas da literatura [10]. A definição do estado de fluidização é importante para garantir que quantificação proposta retrate o regime a ser controlado.

3.1 Caracterização de partículas

As partículas selecionadas para os ensaios de quantificação de regimes de fluidização são classificadas nos grupos B e D de Geldart. Esta classificação possui baixa força de coesão entre partículas e pode ser facilmente fluidizável nos regimes borbulhante, turbulento, rápido e o transporte pneumático. O critério de escolha foi baseado na semelhança com partículas de carvão, sob o ponto de vista da facilidade de fluidização.

A Tabela 1 apresenta resultados de medições laboratoriais para três tipos de partículas. A intenção de usar três diferentes tipos de partículas é de avaliar a capacidade dos quantificadores de regimes, baseado nas invariantes do

caos de séries temporais de flutuação de pressão, de serem influenciados pelas propriedades físicas das partículas. A esfericidade das partículas foi negligenciada como parâmetro significativo na interação fluido-partícula.

Tabela 1 - Medições da massa específica e porosidade de leito empacotado para o vidro 355 μm , areia 1,0 mm e areia 1,2 mm.

	Massa específica [kg/m ³]	Porosidade de leito empacotado
Vidro 355 μm	2440 \pm 30	0,416 \pm 0,003
Areia 1,0 mm	2570 \pm 20	0,436 \pm 0,004
Areia 1,2 mm	2600 \pm 40	0,481 \pm 0,005

3.2 Aquisição de dados

Como toda medição pode ser influenciada por ruídos espúrios do ambiente, este tópico trata dos cuidados usados para redução deste. A informação de flutuação de pressão estática é convertida num sinal de tensão elétrica, conduzido por fios até um sistema de aquisição de dados. Desde de a conversão do sinal, passando por sua condução até a placa de aquisição de dados, estão sujeitos a interferência de ruídos eletromagnéticas irradiados e conduzidos. As proteções utilizadas nesta bancada envolvem o uso de blindagem em cabos, gaiolas de Faraday nas placas de aquisição de dados e isolamento das fontes de alimentação dos motores (potência) e do sistema de instrumentação e aquisição.

O estudo de desempenho da medição tem o objetivo ressaltar as contribuições dos cuidados aplicados para imunizar o DAq e os instrumentos nele conectados. Neste ensaio, os geradores de ruído (inversores, roteadores, celulares, switch, flutuações nativas da rede) e os meios de atenuação (blindagem de cabos, blindagem por gaiola de Faraday e isolamento da rede elétrica) são colocados à prova.

Apesar da grande atenuação dos métodos de blindagem utilizados, uma pequena parcela de flutuações espúrias pode induzir a instrumentação e o DAq. Métodos digitais podem ser aplicados para melhorar a visibilidade das flutuações face a interação fluido-partícula e não aos ruídos espúrios remanescentes.

4.0 - METODOLOGIA DE QUANTIFICAÇÃO DE REGIMES

A metodologia aqui proposta, contribui para a quantificação de sistemas de leito fluidizado. Seu diferencial, em relação a outros trabalhos [3] [11] [12], é a consideração do problema espaço-temporal (distribuído), não-linear de comportamento caótico. Tal consideração implica numa proposta de quantificação para leito fluidizado com medidas distribuídas (mais de uma tomada de medição) ao longo da coluna e avaliação de invariantes do caos (e não mais variantes estatísticas).

A vantagem da avaliação de um sistema dinâmico, como os leitos fluidizados, a partir das invariantes do caos, está em sua capacidade de extrair características dinâmicas que pouco depende da escala do sistema [8] [5] [13] [14] [15]. Supondo que uma coluna de escala laboratorial (0,11 de diâmetro e 1,1 m de altura), operando com 8% de nível de leito de areia 1,0 mm (diâmetro de partícula) e em regime borbulhante, apresentasse na base um valor de entropia maior do que o topo, em teoria, esse comportamento deve ser preservado, caso o mesmo ensaio (condição de regime, diâmetro e densidade de partícula, altura inicial, etc.) fosse realizado numa coluna escalonada (por exemplo, 0,2 m de diâmetro e 6,8 m de altura).

A metodologia de quantificação experimental é dividida em três. Na primeira, são discutidas as características para o projeto da coluna levando em conta os tipos de partícula, a construção da coluna e malha circulante/válvula L. A segunda etapa trata dos cuidados de instrumentação para atenuação de ruído e captura de dados. Na terceira etapa, são descritos os tipos de partículas, os regimes experimentais definidos e os ensaios para quantificação de regimes experimentais, calculando as invariantes locais, a partir das séries temporais do sinal de pressão estática.

4.1 Regimes experimentais

O mesmo procedimento utilizado para identificar os regimes de fluidização na coluna numérica, foi utilizado para a coluna experimental. Com parede transparente, um operador pode desenvolver diversos regimes de fluidização modificando o fluxo de ar, através da mudança da rotação do ventilador. Os regimes experimentais desempenhados foram: expandido, borbulhante, turbulento e rápido. Contudo, apenas os regimes borbulhante, turbulento e rápido foram investigados, pois a modelagem numérica usada não previu satisfatoriamente a expansão do leito.

O primeiro regime experimental alcançado foi o expandido, conforme a Figura 3. Nele, uma pequena expansão pode ser visualmente verificada e uma flutuação da superfície do leito. Nesse regime, o ar atravessa o leito sem deformá-lo, distanciando as partículas, mas mantendo o leito coeso.

Conforme a Figura 3, o regime borbulhante foi identificado variando a rotação do ventilador até a confirmação visual de formação de bolhas através do leito de partículas. Nesse regime, bolhas são formadas e atravessam o leito em grande velocidade, promovendo seu movimento, mas o leito continua coeso. As bolhas provocam flutuações características na medição de pressão de base.

Aumentando a rotação do ventilador, a partir do regime borbulhante, percebe-se que as bolhas discretas se transformam numa passagem de ar mais contínua, pela parte central do leito, tornando-se o regime turbulento. O ar na parte central, promove arrasto nas partículas, e à medida que caminham pelo bordo livre (*freeboard*), dissipam a energia de transporte, provocando um movimento de sobe e desce no leito, conforme indicado na Figura 3.

A partir do regime turbulento, e aumentando a rotação do ventilador até que a passagem de ar, pela parte central, torne-se plenamente contínua e seja possível identificar uma circulação interna, o escoamento alcança o regime rápido. A Figura 3, apresenta um instantâneo do escoamento núcleo-anelar, característico do regime rápido, onde a porção central diluída é arrastada para topo da coluna, enquanto a porção anelar densa cai para a base da coluna. O regime de transporte pneumático não foi investigado devido ao subdimensionamento do diâmetro de descarga inferior de sólidos do ciclone da planta proposta. Quando ocorrer o transporte pneumático, na coluna, todo o material acumulava no ciclone e o inventário de massa reduzira a zero.

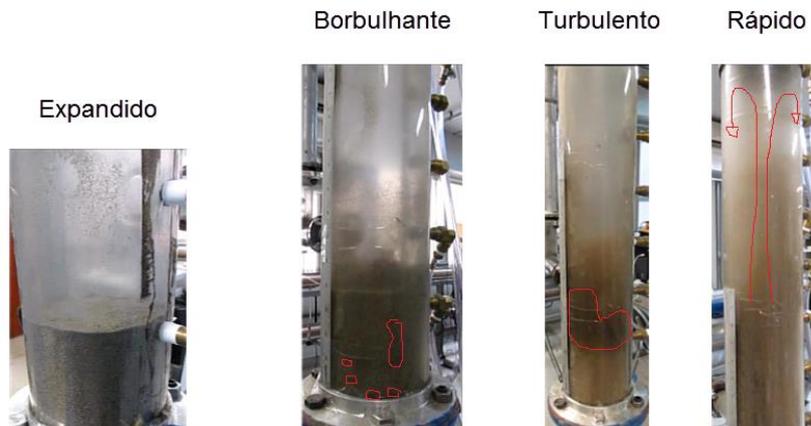


Figura 3 - Definição dos regimes de fluidização experimental usados para nova proposta de quantificação.

Através de uma coluna LFC transparente, um operador treinado consegue facilmente controlar um regime de fluidização. A necessidade de colunas LFC opacas, reside no uso de materiais refratário para conservação de calor, em aplicações de secagem, pirólise, gaseificação e combustão.

O conhecimento prévio da distribuição de rotações para cada tipo de partícula, com mesmo nível de leito, permite realizar ensaios capazes de produzir séries temporais dos sinais de flutuação de pressão estática, em três regiões da coluna LFC, e com tamanho adequado. Cada série observada pode ser submetida a um processo para quantificação de suas flutuações e evolução ao longo de diferentes posições da coluna e condições operacionais (regimes) submetidos. O procedimento experimental descreve como os ensaios são planejados para alcançar a proposta de quantificação global do regime de desenvolvido numa coluna LFC.

4.2 Regiões características

Num escoamento bifásico (gás-sólido), há presença de sólidos provoca alterações mensuráveis na flutuação (amplitude e frequência) de pressão estática conforme o regime local [16]. O desenvolvimento dos regimes de fluidização ao longo de uma coluna, implicam na formação de regiões com porosidades características e consequentes flutuações.

O comportamento experimental qualitativo, na base, corrobora com os dados de [16], onde a gravidade tenta manter o leito de partículas coeso, indicando região com as maiores flutuações de pressão e fração de sólidos da coluna. Na região do meio, qualitativamente, houve um disparate entre as flutuações de pressão estática experimental e numérica, onde a primeira apresentou amplitudes maiores. E na região do topo, qualitativamente, os efeitos experimentais da saída da coluna apresentaram amplitudes maiores nas flutuações do que apresentado em simulação numérica [12].

Para encerrar o processo de aquisição de dados, é preciso conhecer a quantidade de amostra, que cada série temporal deve conter, para que as incertezas de estimação de invariantes do caos permaneçam abaixo de 1%. Este estudo deve levar em conta a velocidade de aquisição do DAq e o tempo de resposta dos medidores de pressão (atraso que o medidor possui em converter a pressão mecânica em sinal condicionado), conforme o próximo item.

4.3 Procedimento experimental

O planejamento do experimento é dividido em três partes: a confirmação influência dos sólidos sob o aspecto das flutuações de pressão estática ao longo da coluna LFC; a quantificação dos regimes, promovida por diferentes gradientes, mas mantendo o nível e inventário de leito constante; e a quantificação dos regimes mantendo o gradiente de pressão constante e promovendo diferentes regimes de fluidização pela redução do nível do leito (o inventário permanece constante para cada escolha de nível de leito).

O ensaio de coluna vazia tem o objetivo de observar o comportamento de invariantes do caos numa coluna sem leito. A importância deste ensaio reside em testar a influência do escoamento multifásico (gás-sólido) nas flutuações de pressão estática e na quantificação local, através das invariantes.

Com uma coluna vazia, a rotação do ventilador foi submetida a diferentes rotações e, portanto, diferentes fluxos de ar. O escoamento monofásico, em diferentes fluxos, pode produzir diferentes flutuações detectável na pressão estática, permitindo a quantificação da coluna vazia.

O ensaio a nível constante, estabelece um leito de 8 cm de nível (proporção de operação de 7-8% da altura da coluna, geralmente, utilizadas em gaseificadores LFC), de diferentes tipos de partícula (vidro e areia), operando com inventário constante (efeito circulante), onde diferentes gradientes de pressão provocam os regimes de fluidização. Em cada patamar de rotação ou regime de fluidização, os dados são gravados durante 10 min e de forma protegida (blindado e isolado da rede) e o ensaio é repetido por cinco vezes para o mesmo tipo de partícula. Em cada repetição três séries temporais (base, meio e topo) são geradas com aproximadamente 18.000 dados cada (já desprezando as partes transientes da série ou cotes mencionados na Figura 2).

Um gradiente fixo de pressão pode provocar diferentes regimes de fluidização, alterando a massa de leito, alterando seu nível. Para cada altura de leito fixada o inventário de massa permanece constante. O propósito deste ensaio é de confirmar a robustez da quantificação pelas invariantes, face aos regimes de fluidização, em diferentes níveis de leito.

O ensaio com gradiente constante foi repetido cinco vezes e apenas para areia 1,0 mm. Cada regime de fluidização teve duração de 10 min de para coleta de dados, o qual produz séries temporais adequadas (em tamanho e taxa amostral) para realização de análises não-lineares.

5.0 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Ensaio de coluna cheia vs coluna vazia

Este ensaio de quantificação visa avaliar a capacidade de uma invariante distinguir flutuações entre coluna vazia e cheia de leito de partículas. A sensibilidade de um invariante em quantificar e detectar flutuações características entre um fluxo monofásico (gás) e bifásico (gás-sólido) pode ter grande utilidade no controle de regimes de fluidização.

A Figura 4 apresenta os perfis de entropia, ao longo de uma coluna LFC, comparando o leito vazio, em diversos fluxos de ar, e um leito com partículas de vidro 355 μm , em diversos regimes de fluidização.

As linhas contínuas da Figura 4, representam os perfis de entropia, variando fluxos do ar de entrada com a coluna vazia. Para o fluxo imposto pela rotação de 1000 RPM (perfil Vazia1000, linha contínua e sem marcador da Figura 4) gera uma entropia maior no meio e igual, na base e no topo. As flutuações espúrias são maiores no centro da coluna do que na base e no topo, que são maais ordenados. Para o fluxo imposto pela rotação de 2000 RPM (perfil Vazia2000, linha contínua e com marcador circular da Figura 4), a estrutura se mantém, porém, deslocada positivamente. Contudo, para um fluxo imposto pela rotação de 3000 RPM (perfil Vazia3000, linha contínua e com marcador quadrático da Figura 4), a estrutura se mantém, porém, deslocada negativamente em relação a rotação de 1000 RPM. O aumento da rotação impõe fluxos com baixos níveis de flutuações espúrias, reduzindo o valor da entropia.

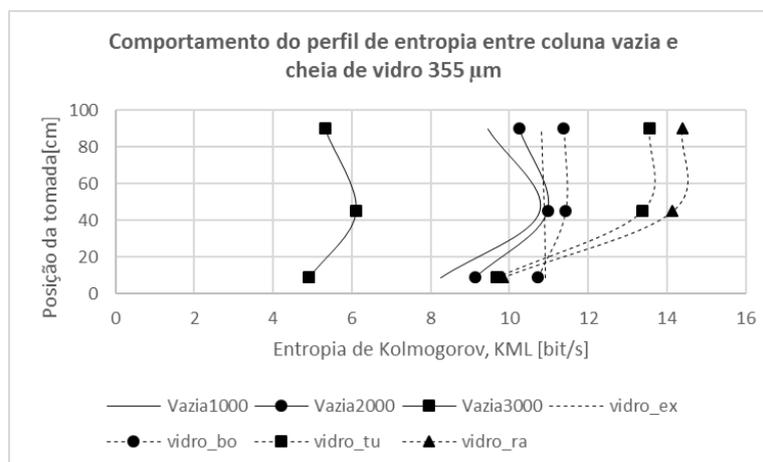


Figura 4 - Comparativo entre os perfis de entropia de coluna vazia e cheia de leito de partícula de vidro 355 μm .

Ao preencher a coluna com um nível de 8 cm de leito de partículas de vidro 355 μm e definir rotações ao ventilador para desempenhar os regimes de fluidização (linhas tracejadas da Figura 4) é possível verificar o impacto do escoamento gás-sólido no sobre a métrica do perfil de entropia. No regime expandido (perfil vidro_ex ou linha tracejada sem marcador da Figura 4), o leito se mantém coeso, e a passagem do fluxo (ar) pelos interstícios do leito, na base, impõe flutuações que permanecem iguais pelo meio e topo da coluna LFC. No regime borbulhante (linha tracejada com marcador circular da Figura 4), o escoamento gás-sólido na base começa a apresentar uma tendência de ordenamento, através da redução da entropia de base, enquanto no meio e no topo, um aumento da imprevisibilidade e do valor da entropia. No regime turbulento (linha tracejada com marcador quadrático da Figura 4), a tendência de redução da imprevisibilidade, na base, e aumento do grau de desordem, no meio e topo, são ainda maiores do que o regime borbulhante anterior. E no regime rápido (linha tracejada com marcador triangular da Figura 4), o comportamento do perfil de entropia do vidro 355 μm na base, é semelhante ao desta partícula no regime turbulento (linha tracejada com marcador quadrático da Figura 4), enquanto no meio e no topo, devido a formação do escoamento núcleo-anelar, a entropia aumentou.

A presença de sólidos aumenta a entropia, quando comparado a um escoamento na mesma sem sólidos, o que corrobora com trabalhos da literatura [14].

Neste ensaio de avaliação entre quantificador, considerando uma coluna vazia e cheia é possível demonstrar que uma invariante do caos, como a entropia de Kolmogorov, pode distinguir, através da flutuação de pressão estática entre a presença ou não de sólidos no escoamento. A próxima etapa reside na investigação de outras invariantes capazes de auxiliar na quantificação dos diversos regimes de fluidização, mas que seja pouco sensível ao tipo de partícula aqui investigada (vidro 355 μm , areia 1,0 mm e areia 1,2 mm).

5.2 Similaridade caótica

A similaridade caótica é o termo designado para avaliar a semelhança entre duas ou mais quantidades, em termos da mesma propriedade do caos [17]. O quociente entre mesmos tipos de invariantes, avaliadas em diferentes posições da coluna LFC, poderiam quantificar a similaridade. Um índice, baseado na razão de características entre regiões, pode ser definido conforme a Equação 3, relacionando as razões de entropias de Kolmogorov entre diferentes regiões i e j da coluna LFC.

$$IK_{ij} = \frac{K_i}{K_j} |i \neq j \text{ e } i, j = \{1, 3, 5\} \quad \text{Equação 3}$$

A razão P_i/P_j relaciona pressões estáticas média entre regiões i e j , mas não é considerado como índice invariante devido a influência do peso das diferentes partículas. O mesmo vale σ_i/σ_j .

A Figura 5 apresenta o comportamento geral do índice de similaridade caótica, baseado na entropia de Kolmogorov. Quando a distância (d_1 , d_2 e d_3 , vide Figura 5) entre IK_{53} e IK_{13} é nula o regime pode ser expandido ou borbulhante. Quando a distância é máxima, encontra-se o regime rápido. E por hipótese e dados simulados, no regime de transporte, existe uma tendência de uniformidade do escoamento, ao longo da coluna LFC, gerando uma similaridade caótica entre todas as regiões e conseqüente redução entre as linhas contínuas e tracejada da Figura 5.

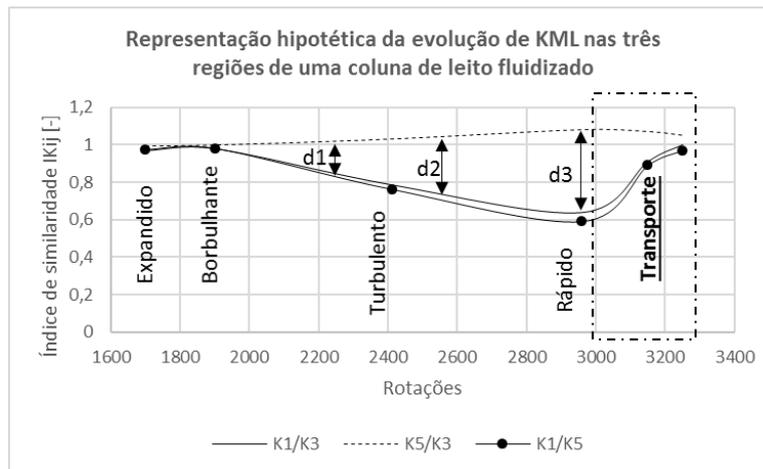


Figura 5 - Comportamento do índice de similaridade caótica, considerando a hipótese do regime de transporte.

6.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho lançou uma nova abordagem na caracterização de regimes de fluidização de um leito fluidizado, a partir da curva característica da razão invariante de interfaces de uma coluna.

Este estudo concluiu que as invariantes do caos foram sensíveis aos regimes de fluidização e pouco dependeram das características das partículas. Apesar desta técnica não ter sido testada em colunas escalonadas, teoricamente, é possível inferir que as invariantes permanecerão sensíveis aos regimes de fluidização e pouco sensível a mudança geométrica de uma coluna escalonada.

O método proposto demonstrou potencial para ser aplicado em controle de processos contínuos de leito fluidizado como limpeza, mistura, recobrimento, granulação, secagem, pirólise, gaseificação e combustão, para manutenção dos regimes de fluidização desejados face as mudanças de inventário de massa. O conceito aqui proposto, associado a instrumentação rápida de medição de pressão estática, poderia ser usado para controlar sistemas fluidizados, em tempo real, de conversão de sólidos, como gaseificadores de leito fluidizado circulante, continuamente. Os principais impactos são redução da complexidade operacional, facilitada por uma malha de controle, grau de turbulência global da coluna, controlado pela manutenção de um determinado regime, redução da variabilidade do gás de gaseificação, devido ao controle do regime, e incremento da repetibilidade do processo. As seguintes contribuições podem ser identificadas: é possível quantificar regimes de fluidização através da avaliação de flutuações de sinais de pressão estática na coluna LFC; o sistema de medição ao longo da coluna LFC deve conter, no mínimo, três tomadas de medição: na base, no meio e no topo; e um índice de divergência da similaridade caótica pode auxiliar no controle automatizado de regimes de fluidização para melhoria de processos industriais.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M. **Energia e Meio Ambiente**. [S.l.]: Thomson, 2003.
2. IEA, I. E. A. **Key world energy statistics: Also available on smartphones and tablets**. [S.l.]. 2016.
3. GE, W.; LI, J. Physical mapping of fluidization regimes—the EMMS approach. **Chemical Engineering Science**, 57, 2002. 3993-4004.
4. VAN DEN BLEEK, C. M. . S. J. C. . Deterministic chaos: a new tool in fluidized bed design and operation. **The Chemical Engineering Journal** 53, 1993. 75-37.
5. CAI, Y.; WAMBSGANSS, M. W.; JENDRZEJCZYK, J. A. Application of Chaos Theory in Identification of Two-Phase Flow Patterns and Transitions in a Small, Horizontal, Rectangular Channel. **Journal of Fluids Engineering**, 118, 1996. 383-390.
6. PLACKO, D. **Fundamentals of Instrumentation and Measurement**. Newport Beach: ISTE, 2007.
7. SMITH, S. W. **The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing**. Second. ed. San Diego: California Technical Publishing, 1999.
8. GURAN, A.; INMAN, D. J. **Smart Structures, Nonlinear Dynamics, and Control**. [S.l.]: Prentice Hall, 1995. 368 p.
9. GRASSBERGER, P. . P. I. . Estimation of the Kolmogorov entropy from a chaotic signal. **Physical review A**, 28, n. 4, October 1983.
10. YANG, W. **Handbook of fluidization and fluid-particle systems**. [S.l.]: Taylor & Francis Group LLC, 2003.
11. DUFOUR, A. **Thermochemical Conversion of Biomass for the Production of Energy and Chemicals**. [S.l.]: ISTE, 2016.
12. TANG, Y. et al. Direct numerical simulations and experiments of a pseudo-2D gas-fluidized bed. **Chemical Engineering Science** 143, 2016. 166–180.
13. DAW, C. S.; HALOW, J. S. Characterization of voidage and pressure signals from fluidized beds using deterministic chaos theory. **Proc. 11 Int. Conf on Fluid. Bed Combustion**, Montral, Ed. E.J. Anthony, 1, 1991. 777-786.
14. SCHOUTEN, J. C.; VANDER STAPPEN, M. L. M.; VAN DEN BLEEK, C. M. Deterministic chaos analysis of gas-solids fluidization. **Fluidization VII, Engen Foundation**, New York, 1992. 103-111.
15. STRINGER, J. Is a fluidized bed a chaotic dynamic system? **Proc. 10 Int. Conf on Fluid. Bed Combustion**, San Fransisco, CA, 1, 1989. 265-272.
16. SAAYMAN, J. et al. Fluidization Regimes Characterized Using a Fast X-Ray Tomography Setup. **The 14th International Conference on Fluidization**, 2013.
17. MORI, H.; KURAMOTO, Y. **Dissipative Structures and Chaos**. Tokyo: Springer, 1997.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Graduado em engenharia controle e automação (2004), especialista em engenharia mecatrônica (2007) e em engenharia de condicionamento e comissionamento pelo PROMINP (2007), mestre em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo (2008) e doutor pela Universidade de Brasília em sistemas eletrônicos e automação (2017). Possui experiência na indústria de base, como pelletização (Vale e Samarco), siderurgia (Arcelor Mital) e transporte de derivados do petróleo (Transpetro e Petrobras). Atua no mercado de prestação de serviço de projeto e desenvolvimento nas áreas de elétrica e automação, pela ECSEE (Empresa Capixaba de Soluções em Eficiência Energética), e pesquisas (FINEP, FAPES, FAPDF) em diversos laboratórios como no Laboratório de Produtos Florestais do IBAMA, no LabPlasma da UFRN, Laboratório de Fluidos e Fenômenos de Transporte da UCL, no laboratório de máquinas de fluxos da UFES, no laboratório de robótica e automação da Unb.

