

Universidade Federal de São João del-Rei

CAMPUS ALTO PARAOPEBA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

SISTEMA DE VISÃO COMPUTACIONAL PARA MEDIÇÃO DE NÍVEL E CLASSIFICAÇÃO DE REGIMES DE OPERAÇÃO DE LEITO FLUIDIZADO

Guilherme Amorim Gomes

Ouro Branco – MG 2019

GUILHERME AMORIM GOMES

SISTEMA DE VISÃO COMPUTACIONAL PARA MEDIÇÃO DE NÍVEL E CLASSIFICAÇÃO DE REGIMES DE OPERAÇÃO DE LEITO FLUIDIZADO

Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal de São João Del-Rei como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo M. de Almeida Co-orientador: Prof. Dr. Edgar C. Furtado Colaborador: Prof. Dr. Reimar de O. Lourenço

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB) e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G633s	GOMES, GUILHERME. SISTEMA DE VISÃO COMPUTACIONAL PARA MEDIÇÃO DE NÍVEL E CLASSIFICAÇÃO DE REGIMES DE OPERAÇÃO DE LEITO FLUIDIZADO / GUILHERME GOMES ; orientador GUSTAVO MATHEUS DE ALMEIDA; coorientador EDGAR CAMPOS FURTADO Ouro Branco, 2019. 67 p.
	Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química) Universidade Federal de São João del-Rei, 2019.
	1. SISTEMA DE VISÃO COMPUTACIONAL. 2. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS. 3. CARACTERIZAÇÃO DE REGIMES DE OPERAÇÃO. 4. LEITO FLUIDIZADO. I. MATHEUS DE ALMEIDA, GUSTAVO, orient. II. CAMPOS FURTADO, EDGAR, co-orient. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo dom da vida. Aos meus pais, Ângela e Marcelino, que mesmo nos momentos difíceis, estavam sempre ao meu lado me apoiando e orientando. A minha esposa, Ana Paula, pessoa mais que especial na minha vida. Sem o seu amor, paciência, dedicação e apoio incondicional, eu não teria chegado até aqui. Amor, essa conquista também é sua.

Agradeço ao meu orientador e co-orientador, Gustavo Matheus de Almeida e Edgar Campos Furtado, e também ao colaborador Reimar de Oliveira Lourenço, pela paciência e ensinamentos, fundamentais para o desenvolvimento desse trabalho.

Ao Daniel Vieira, da Opencaad, por toda ajuda e colaboração.

Agradeço a Ferrous Resources do Brasil e ao Marcio J. Resende, pelas vezes que me ausentei do meu trabalho para me dedicar ao mestrado. Jamais me esquecerei dessa grande ajuda e pela confiança que depositaram em mim.

Aos meus amigos do PCM-Usina, por todo apoio e companheirismo durante essa jornada.

Aos funcionários do LEQ, Flaviana Pena e José Luiz, pela atenção e paciência.

A todas as pessoas, que contribuíram para a conclusão desse trabalho.

Obrigado!

"Não tentes ser bem sucedido, tente antes ser um homem de valor." (Albert Einstein)

RESUMO

Os leitos fluidizados são equipamentos de grande importância nas indústrias químicas, pois proporcionam excelentes efeitos de mistura entre fases e altas taxas de transferência de calor e massa. Dentre as mais diversas aplicações estão as sínteses e reações catalíticas, os processos de mistura, de granulação, de revestimento e de secagem. Nessas aplicações, mudanças indesejadas nos parâmetros de fluidização devem ser detectadas com o menor tempo possível, de forma e se evitar problemas como, por exemplo, a formação de aglomerados, colapso do leito e uma má qualidade do produto. Para evitar que tais eventos aconteçam, diversos métodos de monitoramento têm sido desenvolvidos, tais como interpretação de sinais de flutuação de pressão frente à vazão do fluido medido no leito. Porém, geralmente os leitos fluidizados industriais possuem um ambiente agressivo para as técnicas de medição invasivas. O objetivo principal desse trabalho é apresentar um método não invasivo de caracterização de regimes de fluidização. O método desenvolvido é baseado no processamento digital de imagens coletadas da coluna central do leito, durante todo o tempo de operação do equipamento. Após o processamento das imagens foi gerado um sinal que representa a altura máxima em que as partículas se encontravam no leito. A partir da informação do nível, dados de vazão e pressão, e com base nas características geométricas do equipamento, características das partículas e propriedades do fluido, foram caracterizados os tipos de regime de operação do leito fluidizado. Os resultados obtidos permitiram realizar a caracterização dos regimes de operação de forma satisfatória. Com o intuito de validar os resultados obtidos, foi realizada uma análise estatística dos dados, utilizando o método de Tukey, que apresentou um resultado importante para uma melhor definição de cada regime de operação. A aplicação da Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform) e auto correlação não disponibilizaram características relevantes para a detecção do regime de operação, embora agregarem um maior número de informações e dados sobre o processo.

Palavras – chave: Leito fluidizado; Nível; Regime de Operação; Processamento Digital de Imagens.

ABSTRACT

Fluidized beds are very important equipment in the chemical industries as they provide excellent phase-to-phase mixing effects and high heat and mass transfer rates. Among the most diverse applications are the synthesis and catalytic reactions, the mixing, granulating, coating and drying processes. In such applications, undesirable changes in fluidization parameters should be detected as soon as possible so as to avoid problems such as agglomeration, bed collapse and poor product quality. To prevent such events from happening, several monitoring methods have been developed, such as interpretation of pressure fluctuation signals in front of the flow of the measured fluid in the bed. However, industrial fluidized beds generally have an aggressive environment for invasive measurement techniques. The main objective of this work is to present a noninvasive method of characterization of fluidization regimes. The developed method is based on the digital processing of images collected from the central column of the bed, throughout the equipment operation time. After processing the images a signal was generated that represents the maximum height at which the particles were in the bed. From the level information, flow and pressure data, and based on the geometrical characteristics of the equipment, particle characteristics and fluid properties, the types of fluidized bed operating regime were characterized. The obtained results allowed to perform the characterization of the operating regimes in a satisfactory way. In order to validate the results obtained, a statistical analysis of the data was performed using the Tukey method, which presented an important result for a better definition of each operation regime. The application of the Fast Fourier Transform and Auto Correlation did not provide relevant characteristics for the detection of the operation regime, although they add a larger number of information and data about the process.

Keywords: Fluidized bed; Level; Regime of Operation; Digital Image Processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição esquemática de um leito fluidizado líquido-sólido	5
Figura 2 - Representação gráfica das etapas do processo de fluidização	6
Figura 3 - Regimes de fluidização de acordo com fase móvel e sua velocidade	7
Figura 4 - Arranjo experimental para captura de imagens e controle de entrada de fluxo.	11
Figura 5 - Elementos de um sistema de processamento de imagens	12
Figura 6 - Máscaras do operador de Sobel para calcular (a) gradiente Gx e (b) gradiente	Gy. 14
Figura 7 - Máscaras do operador de Prewitt em sucessivas rotações de 90°	15
Figura 8 - Imagem de TSM de junho de 1996 - Filtro de Canny	16
Figura 9 - (a) Imagem 2-D (b) Esqueletização da Imagem 2-D	17
Figura 10 - Transformada de <i>Fourier</i> de uma forma de onda quadrada	20
Figura 11 - Transformada de <i>Fourier</i> de uma forma de onda quadrada	20
Figura 12 - Transformada de <i>Fourier</i> de uma forma de onda pulso	21
Figura 13 - Leito fluidizado do Laboratório de Engenharia Química II da UFSJ	22
Figura 14 - Distribuidor Prato Perfurado Simples	23
Figura 15 - Suporte para WebCam	23
Figura 16 - Transformação de imagem colorida para escala de cinza	27
Figura 17 - Imagem redimensionada	28
Figura 18 - Imagem binarizada	29
Figura 19 - Filtro de Sobel	30
Figura 20 - Filtro de Prewitt	30
Figura 21- Filtro de Canny	31
Figura 22 - Imagem com bordas inadequadas	31
Figura 23 - Imagem com correção de borda	32
Figura 24–Esboço da imagem com escala	33
Figura 25 - Manômetro de Tubo em U	34
Figura 26 - Curva da Queda de Pressão (Pa) versus Vazão de entrada de água (m ³ /s), n	o leito
fluidizado	35
Figura 27 - Vazão x Altura do Nível do Leito	36
Figura 28 - (a) Gráfico de barra de erros e (b) box-plots, dado o regime de operação	37
Figura 29 - Histogramas dos regimes de operação	38
Figura 30 - Teste de Tukey de comparações múltiplas	39
Figura 31 - Esquemático geração de sinal	40

Figura 32 – Espectro de potência para Leito Fixo	41
Figura 33 - Variação do nível em função do tempo para Leito Fixo	41
Figura 34 - Espectro de potência para Leito Expandido	
Figura 35 - Variação do nível em função do tempo para Leito Expandido	
Figura 36 - Espectro de potência para Mínima Fluidização	
Figura 37 - Variação do nível em função do tempo para Mínima Fluidização	43
Figura 38 - Espectro de potência para Fluidização Leve	44
Figura 39 - Variação do nível em função do tempo para Fluidização Leve	44
Figura 40 - Auto correlação Leito Fixo	45
Figura 41 - Auto correlação Leito Expandido	45
Figura 42 – Auto correlação Mínima Fluidização	46
Figura 43 – Auto correlação Fluidização Leve	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 ·	- Regime de operação baseado em altura	34
Tabela 2 -	- Estatística descritiva	37
Tabela 3 ·	- Análise de variância.	39

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

FCC	Fluid Catalytic Cracking (Craqueamento Catalítico Fluido)
m	Unidade de medida para comprimento (metro)
mm	Unidade de medida para comprimento (milímetro)
m^3/s	Unidade de medida para vazão (metros cúbicos por segundo)
Pa	Unidade de medida para pressão (Pascal)
PIXEL	Picture element (Elemento de imagem)
RNA	Redes neurais artificiais
USB	Universal Serial Bus (Barramento serial universal)
FFT	Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier)
DTF	Discrete Fourier Transform (Transformada Discreta de Fourier)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	4
	2.1 Objetivo geral	4
	2.2 Objetivos específicos	4
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
	3.1 Leito fluidizado	5
	3.2 Uso de processamento de imagem em leito fluidizado	8
	3.3 Uso de processamento de imagem para classificação de regimes de operaçã em leito fluidizado	ίο .0
	3.4 Processamento Digital de Imagens1	1
	3.5 Processamento Digital de Imagens: Técnicas de detecção de bordas 1	2
	3.5.1 Operador de Sobel1	.4
	3.5.2 Operador de Prewitt 1	5
	3.5.3 Operador de Canny 1	5
	3.5.4 Esqueletização1	7
	3.6 Uso de processamento de imagem em aplicações industriais em geral 1	7
	3.7 Transformada de <i>Fourier</i> 1	9
4	MATERIAIS E MÉTODOS	22
	4.1 Materiais	22
	4.3 Aquisição das imagens2	24
	4.4 Processamento das imagens de operação do leito fluidizado2	24
	4.5 Classificações de regimes de operação do leito fluidizado2	25
	4.6 Medição de vazão e queda de pressão2	25
	4.7 Análise estatística2	25
	4.8 Aplicação da Transformada Rápida de Fourier2	26
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES2	27

	5.1 Processamento das imagens	27
	5.2 Caracterização dos regimes do leito fluidizado	33
	5.3 Análise Estatística	36
	5.4 Aplicação da FFT	39
	5.4.1 Espectro de potência e variação do nível em função do tempo	41
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
7	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	48
8	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

Os leitos fluidizados são equipamentos com ampla possibilidade de uso em várias indústrias, como farmacêutica, alimentícia, agrícola, mineral, petrolífera, dentre outras. Como exemplos de operação podem-se citar o craqueamento catalítico de petróleo e a produção de polímeros em leitos fluidizados gás-sólido. A ampla aplicação de leitos fluidizados é devida à homogeneidade térmica, contato eficiente entre as fases fluida e particulada, alta capacidade de mistura e altas taxas de calor e de transferência de massa (BORÉL, 2018).

Em muitas aplicações de grande escala, os processos contínuos são mais eficientes do que os processos em batelada, tornando necessário aplicar técnicas de monitoramento eficazes. Por exemplo, nas indústrias farmacêuticas, os leitos fluidizados são amplamente aplicados em processos de mistura, granulação, revestimento e secagem. Nessas aplicações de leitos fluidizados, mudanças indesejáveis nos parâmetros de fluidização, como tamanho de partícula, velocidade e temperatura do gás, devem ser detectadas rapidamente para evitar situações indesejáveis, como aglomeração e desfluidização, levando a uma qualidade inadequada do produto (BABAEI *et al.*, 2012).

Mesmo reatores bem projetados encontram problemas de distribuição de gás quando o distribuidor fica obstruído ou partículas se aglomeram comprometendo a operação. Formas simples, robustas e eficazes de determinar o regime de fluxo e a distribuição de gás em unidades industriais possibilitariam a manutenção de condições operacionais ótimas através do controle *on-line* da velocidade do líquido ou do gás (BRIENS *et al.*, 1997).

Diversos métodos têm sido propostos para caracterização de regimes de fluidização: inspeção visual, estudo de médias de tempo como o perfil de concentração de sólidos axiais e interpretação de sinais de flutuação a partir de medidas no leito (NEDELTCHEV, 2015).

Os métodos invasivos requerem contato direto do sensor com o fluxo durante a medição. Isso pode causar perturbações indesejadas no campo de fluxo. A resolução espacial de métodos invasivos geralmente não é muito elevada, um sensor pode medir um número limitado de pontos discretos por vez. O aumento do número de pontos de medição aumentará a perturbação do fluxo e, consequentemente, a incerteza dos dados (FU; LIU, 2018).

Em geral, os leitos fluidizados industriais apresentam um ambiente hostil para as técnicas de medição. Não são apenas a temperatura e a atmosfera quimicamente agressiva que

devem ser consideradas, mas também o estresse mecânico devido ao movimento vigoroso das partículas do leito. Devido a essas características, métodos de medição não invasivos apresentam importantes vantagens (WERTHER, 1999).

Por exemplo, técnicas de radiologia foram utilizadas com sucesso por Gamblin *et al.*(1993) para obter uma visão ampla do leito fluidizado. Com os resultados obtidos pelo método foi possível aperfeiçoar a distribuição de ar para um regenerador FCC (do inglês, *Fluid Catalytic Cracking*). As imagens de raios-x revelaram fortes interações entre os jatos de gás emitidos pelos bicos de gás vizinhos, que eram bastante inesperados com base nas previsões da literatura sobre o comprimento do jato.

Yang e Zhu (2014) utilizaram a técnica de processamento de imagens para visualização de *clusters* (aglomerado de partículas) em um leito fluidizado. Para garantir que as imagens obtidas fossem confiáveis e comparáveis sob a mesma iluminação durante todo o período de disparo, foi utilizada uma placa de referência para verificar a consistência de iluminação. Após a verificação, a relação entre a retenção de sólidos e a escala de cinza da imagem foi usada como parâmetro de calibração.

Nas últimas décadas, pesquisadores desenvolveram novas técnicas não invasivas de medição, com capacidade de extração de informações (WIDYATAMA; DINARYANTO; DEENDARLIANTO, 2018). A utilização de técnicas de processamento de imagens, que podem ser usadas para capturar características físicas dos fluxos, sem a necessidade de sensores invasivos, é uma metodologia relativamente nova (BECK *et al.*, 2018).

Embora existam algumas limitações, como a necessidade de uma área de observação transparente, as vantagens que são fornecidas pela técnica de processamento de imagem fazem este método classificado como um método de grande potencial (WIDYATAMA; DINARYANTO; DEENDARLIANTO, 2018).

A avaliação de imagens de vídeo obtidas em sistemas de leito fluidizado ainda é um problema prático. Porém, devido à ampla aplicação de métodos de imagem, rotinas padrão estão disponíveis para pré-processamento de imagens, por exemplo, correção de sombreamento e aprimoramento de contrastes e para análise de imagem digital, por exemplo, segmentação de imagem com base em níveis de limiar de escala de cinza e segmentação de elementos parcialmente sobrepostos (BURKHARDT; BREDEBUSCH, 1996).

Na maioria das literaturas encontradas, para a compreensão do mecanismo de fluidização de sólidos em determinado processo, os autores julgam necessária à determinação de parâmetros fluidodinâmicos, como velocidade, porosidade e pressão de mínima fluidização, que traduzem o comportamento do leito poroso quando da passagem do leito fixo para o fluidizado (CUNHA, 2004).

Com o intuito de desenvolver uma nova metodologia para identificação dos regimes de operação, o presente trabalho utiliza técnicas de processamento digital de imagens, aplicadas para o reconhecimento e identificação do nível do leito, afim de caracterizar os regimes de operação do equipamento de estudo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente projeto tem por objetivo construir um sistema de visão computacional para classificação de regimes de operação de leito fluidizado. Essa classificação será baseada na medição do nível do leito fluidizado líquido-sólido existente no Laboratório de Engenharia Química (LEQ) da Universidade Federal de São João Del Rei, Campus Alto Paraopeba (UFSJ-CAP).

2.2 Objetivos específicos

Para a realização do trabalho, os objetivos específicos estão baseados em:

- Construir um sistema de aquisição e processamento de imagens em tempo real;
- Propor uma metodologia de coleta e análise de imagens aplicáveis no contexto de leitos fluidizados;
- Analisar ferramentas de extração de características como FFT e FAC.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Leito fluidizado

O leito fluidizado é um equipamento caracterizado pela operação onde o material particulado é colocado em suspensão, em um duto vertical (permeâmetro), submetido a um fluxo ascendente de fluido, com vista ao processamento de determinado produto de alto valor agregado. Dadas as suas elevadas taxas de transferências de calor e massa, os leitos fluidizados são muito utilizados em processos industriais, tais como combustão ou gaseificação de carvão e biomassa, secagem, arrefecimento e revestimento de sólidos (BENALCÁZAR; FRANKLIN, 2019).

Face ao seu potencial de uso, são considerados importantes em algumas operações essenciais em engenharia química, justamente por que proporcionam a intensificação das características de transferência de massa e calor em virtude de suas excelentes propriedades de contato e mistura de fases. A Figura 1 mostra o esboço de um leito fluidizado líquido-sólido e seus principais componentes (LI; LIUA; LI, 2018).



Figura 1 - Composição esquemática de um leito fluidizado líquido-sólido

A fluidização é uma operação que tem início com um fluxo de fluido ascendente, permeando um aglomerado de partículas que ao adquirir velocidade suficiente para suportálas, proporciona uma maior eficiência de contato entre os sólidos e fluidos envolvidos. Nesta situação, o conjunto de partículas sólidas pode assumir comportamento semelhante ao estado líquido e, a partir daí, por meio das forças gravitacionais e de contato, o leito passa a adquirir propriedades similares a um fluido, com as partículas podendo se mover relativamente livres, tornando seu comportamento único (GIBILARO, 2001). A operação de um leito fluidizado dentro de um específico e estável estado fluidodinâmico é importante para o controle das interações partícula-partícula e gás-partícula devido os efeitos de desgaste das partículas e dos parâmetros de transferência de calor no leito. Muitos pesquisadores têm usado as curvas de fluidização, obtidas a partir de diferentes metodologias, para determinar os índices de qualidade da fluidização, que incluem formação, ascensão e ruptura das bolhas de gás, velocidade e tamanho das bolhas, movimento dos sólidos e propagação das ondas de pressão através do leito (COSTA, 2010).

Desta forma, são encontradas na literatura curvas fluidodinâmicas, em função do sistema particulado analisado, apresentando algumas formas características distintas. A Figura 2 exemplifica uma destas curvas, apresentada por Kunii e Levenspiel (1991), para os diferentes sistemas encontrados nas condições práticas e a análise desta figura indica os regimes de fluidização e os parâmetros de interesse em um processo de fluidização.





Fonte: Adaptado de KUNII & LEVENSPIEL, 1991.

Inicialmente tem-se uma relação linear entre a velocidade e a queda de pressão dentro do leito o que caracteriza a operação em leito fixo (0–A), pois o fluxo de ar escoa através do leito a uma taxa pequena sem provocar movimento das partículas. A partir deste ponto, com um pequeno aumento do fluxo de gás, as partículas começam a vibrar e mover-se em algumas regiões do leito, caracterizando o chamado leito expandido (A-B). Observa-se que com o aumento da velocidade superficial do gás, atinge-se um valor de queda de pressão máxima (Δ Pmáx – ponto B); a partir deste ponto o gás consegue vencer a força peso da massa de partículas e as forças interpartículas. Nesse instante as partículas começam a movimentar aleatoriamente e a queda de pressão diminui para C onde a fluidização se instala, e após pequenas oscilações, atinge-se um valor constante chamado queda de pressão de mínima

fluidização (ΔPmf – ponto C). Este comportamento constante caracteriza um sistema ideal com partículas uniformes. Após o ponto D, as partículas começam a ser carregadas pelo fluido e perde-se a funcionalidade do sistema (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

A literatura clássica apresenta vários estudos relacionados com a análise e descrição dos fluxos de sólido e gás e as características predominantes de contato sólido-fluido em unidades de fluidização. As possibilidades de contato ou o regime de fluxo das fases varia largamente, dependendo do tamanho médio, massa específica e forma das partículas; da densidade, viscosidade e velocidade média do fluido, além da geometria do leito. A Figura 3 apresenta alguns desses regimes (COSTA, 2010).



Figura 3 - Regimes de fluidização de acordo com fase móvel e sua velocidade.

Na Figura 3 (a), observa-se o regime de leito fixo. Conforme dito anteriormente, nesse estágio, o fluido apenas percola por entre o leito de partículas sem colocá-las em movimento. O leito fixo é observado nos leitos ditos homogêneos, bem como, nos leitos heterogêneos. Com um aumento da velocidade superficial do fluido, as partículas se afastam e algumas vibram e se movem em regiões restritas, caracterizando assim um leito expandido (CREMASCO, 2012).

Com uma velocidade superficial do fluido um pouco maior, um ponto é alcançado onde todas as partículas são colocadas em movimento. Este ponto é conhecido com mínima fluidização e a partir daí, estabelece-se o estádo de fluidização. Neste ponto, a força friccional entre a partícula e o fluido equilibra o peso das partículas. A força vertical de compressão entre as partículas adjacentes desaparece e a pressão em qualquer ponto é a mesma, caracterizando um leito fluidizado incipiente ou de mínima fluidização, na Figura 3 (b) (GELDART, 1986).

Fonte: Adaptado de CREMASCO, 2012.

Em sistemas líquido-sólido (L/S), um aumento na taxa de fluxo acima da fluidização mínima geralmente resulta em uma expansão suave e progressiva do leito, tornando-se homogeneamente fluidizado, como pode ser visto na Figura 3 (c) (GELDART, 1986).

Geralmente, os sistemas gás-sólido (G/S) se comportam de maneira um pouco diferente. Com um aumento na taxa de fluxo além da fluidização mínima, grandes instabilidades com borbulhamento e canalização de gás são observadas. Em taxas de fluxo mais altas, a agitação se torna mais violenta e o movimento de sólidos se torna mais vigoroso. Além disso, o leito não se expande muito além de seu volume com mínima fluidização, denominando-se o leito fluidizado borbulhante, representado na Figura 3 (d). Em alguns casos raros, os sistemas (L/S) também se comportam como leitos borbulhantes. Isso ocorre apenas com sólidos muito densos fluidizados por líquidos de baixa densidade (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Em sistemas (G/S), as bolhas de gás se aglomeram e crescem à medida que sobem, e em um leito de diâmetro pequeno o suficiente, podem eventualmente tornar-se grandes o suficiente para se espalharem pelo vaso. No caso de partículas finas, elas se movem suavemente pela parede ao redor do vácuo crescente de gás. Isso é chamado de *slugging*, com *slugs* axiais, como mostrado na Figura 3 (e) (MARQUES, 2004).

Os leitos fluidizados são equipamentos que dependem de variáveis como vazão de entrada de fluido, altura de nível e variação de queda de pressão. Para garantir o seu bom funcionamento, é de fundamental importância que essas variáveis estejam dentro dos padrões estabelecidos a depender do tipo de regime de funcionamento do leito.

A eficiência do leito fluidizado depende de vários parâmetros incluindo a diferença relativa nas propriedades do material (tamanho, densidade e forma), a composição da mistura binária, a velocidade do gás ou líquido de operação, a taxa de fluxo de sólidos na coluna de fluidização, a altura do leito e outros parâmetros geométricos do leito fluidizado (CHLADEK *et al.*, 2018).

3.2 Uso de processamento de imagem em leito fluidizado

Nos últimos anos, graças ao contínuo desenvolvimento de sistemas de imagem digital e processamento digital de imagens, um grande número de pesquisadores optou por métodos visuais digitais para serem aplicados no campo da dinâmica experimental de fluidos. Existem muitos estudos, baseados em processamento de imagens, a cerca de controle dessas varáveis (BUSCIGLIO *et al.*, 2008). Há um grande número de ferramentas de processamento de imagens que podem ser usadas para preparar imagens digitais para a medição dos recursos e estruturas que elas revelam (RUSS, 2011).

Por exemplo, Ajbar, Marsy e Ali (2009) utilizaram imagens de vídeo para operar colunas de bolhas no regime homogêneo e identificar precisamente seu regime. Assim, utilizaram ferramentas de processamento de vídeo digital para acompanhar o movimento de bolhas dentro da coluna obtendo imagens que, após tratadas, puderam ser utilizadas em controladores digitais com sucesso.

Com relação a leitos fluidizados, definir o tipo de regime que o leito está operando é de fundamental importância para seu bom rendimento e aplicação industrial. Assim, vários estudos de técnicas não invasivas sobre o controle e operação dos leitos já foram realizados (XU *et al.*, 2004).

Na gaseificação de leito fluidizado, por exemplo, o uso de materiais densos, como biomassa, pode levar a problemas graves, como aglomerações indesejadas. Liukkonen, Hiltunen e Hiltunen (2015), desenvolveram um estudo para avaliação do estado do leito fluidizado por análise e modelagem de imagens concluindo que os testes mostraram que a análise de imagem desenvolvida permite o monitoramento da grossura de grãos de biomassa e que o sistema de monitoramento pode ser usado para alertar quanto à possibilidade do aglomeramento de material e indicar necessidade de peneiramento adicional.

Yang e Zhu (2014) desenvolveram com sucesso um novo método de processamento de imagem baseado na calibração da imagem através da quantidade de luz irradiada, para visualizar e corrigir possíveis aglomerados em um tubo de leito fluidizado circulante.

Zhu, Yu e Dave (2005) relataram um estudo sobre a caracterização de aglomerados na fluidização de nano partículas. Esse estudo realizou a distribuição de tamanho de aglomerados na superfície do leito pelo uso de técnicas de imagem. As imagens foram gravadas por uma câmera, processadas *offline* por *software* de computador, a fim de obter gráficos detalhados de distribuição de tamanho de aglomerados.

3.3 Uso de processamento de imagem para classificação de regimes de operação em leito fluidizado

Inúmeros fatores podem afetar a qualidade da fluidização, tais como a geometria do leito, sistema de distribuição do gás à entrada do leito, tipo de sólido usado e característica do fluido (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Em um estudo realizado por Dogan e colaboradores (2000, *apud*, LOURENÇO, 2006) foi verificado que os regimes de fluxo variavam consideravelmente de acordo com as dimensões de quatro leitos estudados e sete regimes de escoamento diferentes foram identificados: leito fixo, jato interno, leito fluidizado, jorro, jorro em fase diluída, *slugging* e jorro inconsciente. Nesse contexto operacional, a previsão de velocidades de transição de regime em reatores multifásicos (colunas de bolhas e leitos fluidizados) é muito importante para seu projeto e aplicação, bem como para sua operação efetiva (NEDELTCHEV, 2015).

De acordo com Xu e colaboradores (2004, *apud*, LOURENÇO, 2006) o reconhecimento de regimes de escoamento por observação visual não é usual em equipamentos em escala industrial ou sujeito a altas pressões, uma vez que os mesmos são confeccionados em materiais opacos não permitindo observação visual. Logo, necessita-se de técnicas não intrusivas para inferir o regime de escoamento a partir de sistema de aquisição de dados de uma medida simples, como a pressão estática ou queda de pressão no leito, por exemplo.

Utilizar imagens para avaliar qual o regime de escoamento de um leito não é uma tarefa muito fácil. A principal desvantagem deste método é que a imagem é necessariamente uma silhueta de bolhas e não podem ser distinguidas com muita precisão. Os métodos de processamento de imagem digital ajudam consideravelmente na melhoria dos resultados com seus códigos de refino (WERTHER, 1999).

O regime de escoamento de um leito está intimamente ligado ao seu nível de operação. Watano, Fukushima e Miyanami (1994) relataram em seu trabalho que o controle da altura do leito ou o monitoramento da condição de fluidização, necessário para evitar problemas de fluidização pobre, era reduzido, ou seja, ainda era necessário melhorar a obtenção do nível de operação do leito. Assim, desenvolveram uma técnica de processamento de imagem com o auxílio de um sensor ultrassônico, que realizava a leitura do nível. Simultaneamente, a condição de fluidização era observada pela câmera de vídeo de fora da coluna, pois o corpo principal do leito era uma coluna de acrílico transparente. As informações eram enviadas para o computador, que convertia os sinais em resposta programada para o sistema de controle. Com a aquisição e tratamento dessas imagens, foi possível definir altura e condição de fluidização do leito. O esquema experimental está mostrado na Figura 4.





Fonte: Adaptado de WATANO, FUKUSHIMA E MIYANAMI, 1994.

No trabalho de Watano e colaboradores (1994), a leitura do nível do leito foi realizada por um sensor ultrassônico. Embora haja uma complexidade para a leitura do nível, o sensor pode corroborar para identificar o regime de operação do leito.

No presente trabalho, a leitura do nível foi realizada somente por uma câmera, mas as imagens coletadas, depois de tratadas, foram suficientes para identificação do regime de operação do leito.

3.4 Processamento Digital de Imagens

O processamento digital de imagens é realizado por um conjunto de técnicas voltadas para análise de dados bidimensionais, que permitem extrair informações relevantes de uma imagem a fim de auxiliar na tomada de decisões. São técnicas com aplicações práticas em diversas áreas como: imagens de satélites, imagens médicas, aplicações em automação industrial, dentre outros (HOLLERBACH; MASSELLI, 2015).

De forma geral, os passos fundamentais em processamento de imagens podem ser

representados conforme Figura 5. De fato, esse diagrama de blocos abrange as principais operações que se pode efetuar sobre uma imagem, a saber: aquisição, armazenamento, processamento e exibição (FILHO; NETO, 1999).

Aquisição Processamento Exibição Câmeras Softwares e Monitores LED Satélites Hardwares Celulares Drones Dedicados Datashow Ultrassom Ĵţ Armazenamento HDs e SSDs Servidores Cloud Computing

Figura 5 - Elementos de um sistema de processamento de imagens.

Tudo se inicia com a captura de uma imagem, realizada através de um sistema de aquisição. Após a captura por um processo de digitalização, uma imagem precisa ser representada de forma apropriada para tratamento computacional, etapa denominada de processamento. Imagens podem ser representadas em duas ou mais dimensões. A saída nada mais é que o resultado final encontrado após todas as etapas anteriores (QUEIROZ; GOMES, 2001).

Contudo, para obter uma visão mais profunda da estrutura de fluxos em estudo, é necessário um aprimoramento das imagens e uma avaliação suportada pelo processamento automatizado de imagens digitais. Antes que os métodos específicos de processamento de imagem sejam aplicados para uma análise detalhada, as imagens devem ser pré-processadas para enfatizar a característica de interesse. Estas técnicas são definidas como refino (LACKERMEIER *et al.*, 2001).

3.5 Processamento Digital de Imagens: Técnicas de detecção de bordas

A crescente necessidade de análise e interpretação automatizada de imagens em uma ampla gama de aplicações requer o desenvolvimento de algoritmos de segmentação. A segmentação envolve particionar uma imagem em um conjunto de regiões homogêneas e significativas, de forma que os pixels em cada região particionada possuam um conjunto idêntico de propriedades ou atributos (ACHARYA; RAY, 2005).

Para realçar características de interesse ou na recuperação de imagens que sofreram algum tipo de degradação, por causa dos ruídos ou perda de contraste, são utilizadas técnicas de refino conhecidas como técnicas de filtragem. Um dos processos desse método tem por objetivo extrair informações como, por exemplo, as bordas das imagens, utilizando filtros de detectores de bordas, que são caracterizadas por mudanças abruptas de descontinuidade na imagem. Uma borda é a fronteira entre duas regiões de níveis de cinza diferentes. (MATURANA, 2010).

Bordas, linhas e pontos carregam muita informação sobre as várias regiões de uma imagem. Embora as bordas e as linhas sejam detectadas a partir da mudança abrupta no nível de cinza, ainda há uma diferença importante entre as duas. Uma borda essencialmente demarca duas regiões distintas, o que significa que uma borda é a fronteira entre duas regiões diferentes. Uma linha, por outro lado, pode ser incorporada dentro de uma única região uniformemente homogênea (ACHARYA; RAY, 2005).

A detecção de bordas de uma imagem pode contribuir na segmentação, na compactação de dados e também na reconstrução de imagens. As variáveis envolvidas na seleção de um operador de detecção de bordas incluem orientação de borda, ambiente de ruído e estrutura de borda (GUPTA; GUPTA; CHAKARVARTI, 2013).

Para a detecção e realce de bordas, são aplicados filtros por derivada utilizando-se máscaras de convolução, também chamadas de operadores de 2x2 ou de 3x3. (MATURANA, 2010).

A operação de detecção de bordas é essencialmente uma operação para detectar alterações locais significativas no nível de intensidade de uma imagem. A mudança no nível de intensidade é medida pelo gradiente da imagem. Como uma imagem f (x, y) é uma função bidimensional, seu gradiente é um vetor do tipo (ACHARYA; RAY, 2005):

$$\begin{bmatrix} \underline{G}_x \\ \overline{G}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d_f}{d_x} \\ \frac{d_f}{d_y} \end{bmatrix}$$
(1)

A magnitude do gradiente pode ser calculada de várias maneiras:

$$\boldsymbol{G}[\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})] = \sqrt{\boldsymbol{G}_{\boldsymbol{x}}^2 + \boldsymbol{G}_{\boldsymbol{y}}^2} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{G}[\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})] = |\boldsymbol{G}_{\boldsymbol{x}}| + |\boldsymbol{G}_{\boldsymbol{y}}|$$
(3)

$$\boldsymbol{G}[\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})] = \max\{|\boldsymbol{G}_{\boldsymbol{x}}|, |\boldsymbol{G}_{\boldsymbol{y}}|\}$$
(4)

A direção do gradiente é:

$$\boldsymbol{\theta}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) = \boldsymbol{tan^{-1}}(\boldsymbol{G}_{\boldsymbol{y}}/\boldsymbol{G}_{\boldsymbol{x}}) \tag{5}$$

onde o ângulo θ é medido em relação ao eixo X.

Os operadores de gradiente calculam a alteração nas intensidades do nível de cinza e também a direção na qual a alteração ocorre. Isso é calculado pela diferença nos valores dos pixels vizinhos, isto é, as derivadas ao longo do eixo X e do eixo Y (ACHARYA; RAY, 2005).

Um detector de borda ideal é aquele que detecta um ponto de borda precisamente no sentido de que um ponto de borda real em uma imagem não deve ser perdido, enquanto um ponto de borda falso, inexistente não deve ser erroneamente detectado. Alguns exemplos mais usuais desses filtros são os operadores de Sobel, Prewitt e Canny (GUPTA; GUPTA; CHAKARVARTI, 2013).

3.5.1 Operador de Sobel

O operador Sobel é um operador de gradiente baseado na matriz de 3x3. As máscaras de composição para o operador de Sobel são definidas pelos dois núcleos mostrados na Figura 6. As duas máscaras são aplicadas separadamente na imagem de entrada (ACHARYA; RAY, 2005).



Figura 6 - Máscaras do operador de Sobel para calcular (a) gradiente Gx e (b) gradiente Gy.

Fonte: ACHARYA; RAY, 2005.

Mathur e colaboradores (2016) utilizaram o operador de Sobel na detecção de imagens de ressonância magnética e verificou-se que, as imagens obtidas são mais realçadas e forneceram a localização exata de um tumor em um cérebro, o que pode ajudar no diagnóstico de tumores através de laser terapia.

3.5.2 Operador de Prewitt

Este filtro convolve a imagem de entrada com sua respectiva máscara de convolução, para gerar uma imagem de gradiente (BHARDWAJ; MITTAL, 2012). O operador Prewitt é definido por um conjunto de oito máscaras, quatro das quais são mostradas na Figura 7. Outros podem ser gerados por rotação de 90°, sucessivamente. A máscara que produzir a resposta máxima produz a direção do gradiente (ACHARYA; RAY, 2005).



Figura 7 - Máscaras do operador de Prewitt em sucessivas rotações de 90°.

Fonte: ACHARYA; RAY, 2005.

Zhang e colaboradores (2013) aplicaram o operador de Prewitt combinado a um algoritmo de avaliação da qualidade da imagem, com objetivo de calcular a qualidade das imagens de forma consistente baseado em avaliações subjetivas. O método proposto realiza primeiramente a transformação das imagens de referência para um espaço de cores do sistema visual humano, que encapsula informações sobre uma cor em termos mais naturais e intuitivos para os seres humanos. Logo após, aplica-se o operador de Prewitt para extrair as principais características de borda de cada canal. Em seguida, a informação mútua regional é calculada para medir a similaridade das duas imagens. Por último, um método de ponderação é utilizado para melhor consistência com avaliações subjetivas, permitindo obter um único índice de qualidade.

3.5.3 Operador de Canny

Desde sua publicação em 1986, o operador de Canny tornou-se um dos operadores de detecção de bordas mais utilizados, pois este filtro visa se afastar de uma tradição de operadores baseados em máscara (DAVIES, 2018).

No operador Canny a imagem é suavizada com as derivadas de primeira ordem do filtro Gaussiano na direção do gradiente local seguido pela detecção de bordas por dois

limiares (BOAVENTURA E GONZAGA, 2007). As bordas fracas são incluídas na imagem de saída apenas se estas estão conectadas às bordas fortes. Desta forma, este processo é menos suscetível a ruídos e mais coerente com as bordas fracas além de fragmentar menos tais bordas. A convolução é relativamente simples de ser aplicada, mas é cara computacionalmente (SEARA, 1998).

A abordagem do operador de Canny é baseada em três pontos básicos. O primeiro ponto é a baixa taxa de erro. É essencial que as bordas que aparecem nas imagens não sejam perdidas e que não haja resposta aos ruídos. O segundo é que os pontos de borda estejam bem destacados. Em outras palavras, a distância entre os pixels das bordas encontrada pelo detector e a borda real deve estar no mínimo. Um terceiro ponto é ter apenas uma reação a uma única borda, ou seja, um sinal nítido, sem ruídos (GUPTA; GUPTA; CHAKARVARTI, 2013).

Dias e colaboradores (2011) utilizaram o filtro de Canny com o intuito de detectar bordas em uma imagem de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) da costa brasileira, a fim de avaliar os resultados de acordo com um mapeamento visual da frente da Corrente do Brasil (CB). Após os experimentos, a aplicação do filtro se mostrou bastante eficiente, identificando completamente a região inicial norte da frente, como mostra a Figura 8. Este operador também se mostrou bem menos suscetível aos ruídos e assim manteve um traçado contínuo.





Fonte: Adpatado de DIAS; SOARES; FONSECA, 2011.

3.5.4 Esqueletização

A esqueletização fornece uma representação efetiva e compacta de um objeto de imagem, reduzindo sua dimensionalidade a um "eixo mediano" ou "esqueleto", preservando as propriedades topológicas e geométricas do objeto. Em duas dimensões (2-D), um objeto é reduzido a um esqueleto de curva que consiste em estruturas unidimensionais (1-D). Em três dimensões (3-D), um objeto pode ser convertido em um esqueleto de superfície, isto é, uma união de estruturas 1-D e 2-D, ou pode ser reduzido a um esqueleto de curva consistindo apenas de estruturas 1-D (SAHA et al. 2016).

Atualmente, os dispositivos multimídia incorporados são projetados para aplicações de alta intensidade computacional, como o processamento de imagens em vários sistemas multimídia. Para Rao e Yedukondalu (2019), algoritmos de processamento de imagem devem ser implementados em plataformas de *hardware* para melhorar o desempenho. A implementação de *hardware* reconfigurável usando matrizes de portas programáveis em campo (*Field Programmable Gate Arrays* – FPGA's) fornece baixa latência com alto desempenho em aplicações em tempo real. Desse modo, eles desenvolveram e implementaram um algoritmo para esqueletizar imagens em escala de cinza 2-D usando o MatLab®. Para analisar os valores de pixel, foi utilizado um operador de janelas de 3x3, que pode ser usado para imagens de qualquer tamanho (X x Y), se a memória do FPGA for suficientemente grande (RAO; YEDUKONDALU, 2019).



Figura 9 - (a) Imagem 2-D (b) Esqueletização da Imagem 2-D.

Fonte: RAO; YEDUKONDALU, 2019.

3.6 Uso de processamento de imagem em aplicações industriais em geral

Sempre se faz necessário o monitoramento de parâmetros industriais como

temperatura, fornecimento de tensão para equipamentos, nível de pressão, nível de altura, monitoramento e gerenciamento de estoque. Não apenas parâmetros como esses, mas até a posição dos objetos também são importantes para se monitorar (RUKMANI *et al.*, 2018).

Devido às crescentes demandas por maior qualidade de produção, os desempenhos de diferentes sistemas, o grau de automação e a complexidade de vários processos industriais, como processos metalúrgicos e químicos, aumentaram substancialmente. Como uma ferramenta importante para atender a essas demandas, o monitoramento de condições de vários equipamentos industriais tem recebido muita atenção (HAJIHOSSEINI; ANZEHAEE; BEHNAM, 2018).

As técnicas de processamento de imagens são alvos de pesquisas nas mais variadas áreas, pois consistem em extrair informações de uma imagem a partir de sucessivas transformações de modo que o resultado final seja adequado para uma aplicação específica. Desta forma, é comum encontrar aplicações que utilizam essas técnicas como na engenharia agrícola, por exemplo. O trabalho realizado por Khatchatourian e Padilha (2008), utilizou o processamento de imagens digitais auxiliado pelas Redes Neurais Artificiais (RNA) com a finalidade de identificar algumas variedades de soja por meio da forma e do tamanho das sementes.

Wang e colaboradores (2014) utilizaram o processamento de imagens para identificar evidências físicas de incêndio elétrico, ou seja, a presença de curto-circuito em componentes elétricos, através de termografia.

Nascimento, Guimarães e Shiguemori (2012) propuseram a utilização de técnicas de processamento de imagens digitais, para auxiliar no reconhecimento de marcos presentes em rodovias, que estejam evidentes em imagens aéreas. Essas técnicas podem ser aplicadas para realizar o tratamento necessário na imagem, permitindo encontrar a melhor maneira de identificar esses marcos com o uso de detectores.

Na área da medicina é muito comum a utilização desta técnica. O processamento de imagens melhora significativamente, através de refino de imagens, exames de diagnóstico médico, facilitando a visualização de pontos de interesse (YOON *et al.*, 2018).

3.7 Transformada de Fourier

O processamento de sinais é uma área da tecnologia que analisa ou modifica um sinal a fim de extrair informações ou adequá-lo a uma aplicação específica. Tais técnicas podem ser aplicadas a diversos tipos de sinais como imagens, áudio, ondas elétricas, fluxo de rede, dentre outros (SHIRADO *et al.*, 2015).

Dentre as diversas técnicas de processamento de sinais existentes, destaca-se o uso de ferramentas matemáticas para representação e manipulação de sinais discretos no tempo e espaço, como a transformada discreta de Fourier e a transformada rápida de Fourier (SHIRADO *et al.*, 2015).

Para processamento de imagens digitais 2D e 3D no domínio de frequências a transformada de Fourier é a ferramenta matemática fundamental que permite a mudança do domínio espacial (*x*) para o de frequência (*u*), e vice-versa. Como imagens são sinais discretos, faz-se essa mudança através da forma discreta da transformada de Fourier (do inglês, *Discrete Fourier Transform* - DFT) (OLIVEIRA; VIEIRA; LIMA, 2008).

A transformada rápida de *Fourier* (do inglês, *Fast Fourier Transform* - FFT) é um método muito eficiente que reordena os cálculos dos coeficientes de uma DFT. Trata-se de um algoritmo, que realiza uma avaliação da DFT com o menor esforço computacional, ao invés de realizar o cálculo da DFT diretamente pela definição. A FFT é uma técnica que possibilita avaliar a DFT de forma mais rápida, sendo uma das maiores contribuições para análises numéricas já realizadas (WALKER, 1996).

Em resumo, a motivação inicial para a criação da transformada rápida de Fourier foi de criar um algoritmo que permitisse acelerar o processamento da interpolação de uma grande quantidade de dados por polinômios trigonométricos, que é um método usado em óptica, mecânica quântica e inúmeros problemas de simulação (GONÇALVES, 2004).

A Transformada de Fourier identifica ou distingue as diferentes frequências de senóides e suas respectivas amplitudes que se combinam para formar uma forma de onda arbitrária. Matematicamente, esta relação é declarada conforme a Equação 2 (BRIGHAM, 1988):

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j2\pi f t} dt$$
(6)

sendo s(t) a forma de onda a ser decomposta dentro de uma soma de senóides, S(f) é a Transformada de Fourier de s(t), e j = $\sqrt{-1}$. Um exemplo de Transformada de *Fourier* de uma função onda quadrada é mostrada na Figura 10.



Figura 10 - Transformada de Fourier de uma forma de onda quadrada

Fonte: BRIGHAM, 1988.

Uma justificativa intuitiva de que uma forma de onda quadrada pode ser decomposta dentro de um grupo de senóides determinados pela Transformada de Fourier é apresentada na Figura 11. Normalmente associa-se a análise de cada função periódica como uma onda quadrada com séries de *Fourier* até a Transformada de *Fourier*. No entanto, as séries de *Fourier* são um caso especial de Transformada de *Fourier* (BRIGHAM, 1988).

Figura 11 - Transformada de Fourier de uma forma de onda quadrada



Fonte: BRIGHAM, 1988.

Se a forma de onda s(t) não é periódica, então a Transformada de *Fourier* será uma função contínua de frequência, isto é, s(t) é representada pelo somatório das senóides de todas as frequências. Para ilustrar, considere a forma de onda pulso e sua Transformada de Fourier, como apresentado na Figura 12. Neste exemplo, a Transformada de *Fourier* indica que a frequência senoidal torna-se indistinguível para a próxima e como resultado, todas as frequências devem ser consideradas (BRIGHAM, 1988).

Figura 12 - Transformada de Fourier de uma forma de onda pulso



Fonte: BRIGHAM, 1988.

A Transformada de *Fourier* é então uma representação da frequência dominante de uma função. Conforme apresentado nas Figuras 10, 11 e 12, a Transformada de *Fourier* da frequência dominante contém exatamente a mesma informação que a função original, uma vez que elas diferem apenas na maneira da representação. Análises de *Fourier* permitem examinar uma função por outro ponto de vista, o domínio da transformada (BRIGHAM, 1988).

Willis e Myers (2001) utilizaram a técnica de FFT para suavizar e aprimorar, simultaneamente, imagens de baixa qualidade derivadas de um banco de dados de impressões digitais, para uso com impressões de baixa qualidade e pontas de dedos danificadas. Verificou-se que a técnica foi 100% adequada no desempenho de sua função.

Bagavac e colaboradores (2019) utilizaram o método de FFT aliada à termografia para dar ênfase em imagens internas de cilindros de aço utilizados por mergulhadores para prever e prevenir danos corrosivos na estrutura interna dos mesmos. Como resultados, a aplicação da FFT permitiu refinar diferentes zonas de cor termográficas identificando corrosão por pites.

Ainda mais desafiador, Angadi e Kagawade (2017), investiram no estudo sobre a técnica de reconhecimento facial, um dos maiores desafios da pesquisa computacional. Variações na imagem da face devido a mudanças na iluminação, expressão e presença de oclusões junto com o envelhecimento apresentam muitos problemas para enfrentar o sistema

de reconhecimento. A aplicação do método de FFT de imagens pré-processadas mostrou que este método tem um alto grau de reconhecimento e é melhor comparado a outras técnicas de reconhecimento de face recentemente relatadas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos para coleta de imagens foram realizados no Laboratório de Engenharia Química (LEQ) II, da Universidade Federal de São João Del Rei, Campus Alto Paraopeba (UFSJ-CAP). A seguir estão descritos os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento dessa dissertação.

4.1 Materiais

Para a realização desse trabalho foi utilizado o equipamento Leito Fluidizado líquidosólido disponível no LEQ II, representado na Figura 13.



Figura 13 - Leito fluidizado do Laboratório de Engenharia Química II da UFSJ.

O equipamento utilizado é composto por (a) o tanque de água, (b) ducto de sucção, (c) conjunto motor-bomba, (d) coluna central do leito, (e) sonda de pressão, (f) retorno (ponto de tomada de vazão) e (g) tubo em "U", para análise da queda de pressão. No equipamento há válvulas para controle de nível, vazão e pressão. Todo o corpo é fabricado em resina acrílica transparente, possibilitando uma melhor visualização do comportamento fluidodinâmico do

leito.

Seu distribuidor de fluxo é do tipo prato perfurado simples, como ilustra a Figura 14, permitindo uma passagem uniforme do líquido em toda seção transversal do leito. A coluna central tem em seu interior partículas de vidro com diâmetro médio de 3,2mm.

Figura 14 - Distribuidor Prato Perfurado Simples.



Foi também utilizada uma câmera do tipo *WebCam*, com resolução de 640x480, com conexão USB 2.0. Para que o posicionamento da câmera fosse o mesmo durante todo o processo de coleta de dados, foi confeccionado um suporte de madeira para sustentação da mesma, Figura 15. Com a fixação do posicionamento da câmera, parâmetros como altura, distância do leito e abertura do foco, não variaram durante os experimentos, garantindo resultados mais assertivos.

Figura 15 - Suporte para WebCam.





4.2 Preparo do leito

Antes de ser iniciada a coleta de dados, o leito fluidizado foi preparado para operação. Este preparo consiste em adicionar água em seu tanque, ajustar as válvulas de controle de vazão e adicionar as partículas de vidro no interior da coluna. Após essas etapas, foi acionado o conjunto moto-bomba e a válvula de controle da vazão do fluxo foi regulada manualmente.

4.3 Aquisição das imagens

Para realizar a aquisição das imagens, primeiramente foi montado o suporte de sustentação da câmera. A câmera ficou posicionada a uma distância de 60 cm da câmara do leito. Com a câmera já montada e fixada no suporte, foi realizado o ajuste de foco da imagem. Essa etapa foi realizada com a câmera já conectada ao computador e utilizando *software* básico de galeria para visualização de imagens de *webcam*. Com a câmera posicionada e ajustada, foi iniciada a coleta de imagens, que foram utilizadas no processamento de imagens.

É importante ressaltar que todos os testes foram realizados durante o período noturno, garantindo assim uma melhor condição de iluminação e consequentemente uma melhor qualidade da imagem. Foi também utilizado um fundo escuro atrás do leito, de modo que na imagem fosse destacada apenas a área de interesse, ou seja, a câmara principal do leito, onde as partículas estavam armazenadas.

As imagens obtidas apresentavam uma resolução de 640x480 pixels e um padrão de cor RGB.

4.4 Processamento das imagens de operação do leito fluidizado

Toda a etapa de processamento de imagens foi realizada através do *software* MatLab[®], versão R2016a. As imagens obtidas foram transformadas para a escala de cinza. Para essa transformação foi utilizada a função 'rgb2gray', já existente na biblioteca do MatLab®.

A segunda etapa do processamento consistiu em realizar um redimensionamento na imagem, a fim de exibir somente a região de interesse de estudo. Para essa etapa, foi utilizada a função "*imcrop*", onde é especificado o tamanho e a posição de corte, como um vetor de posição de quatro elementos, sendo eles os valores mínimos dos eixos x e y e os valores de largura e altura, sendo representados da seguinte forma: [x_{min} y_{min} largura altura] (MATLAB®, 2018).

Para o processamento adequado, foi necessário binarizar a imagem. Para separar os objetos que se deseja analisar da imagem inicial, utilizam-se técnicas de binarização que consistem em separar uma imagem em regiões de interesse e não interesse através da escolha de um ponto de corte.

Com a imagem binarizada, foi realizada a etapa de detecção de borda. Foram testados três filtros para detecção de borda: filtro de Sobel, de Prewitt e filtro de Canny. Ao final, foi inserida uma escala para representar a altura real do leito.

4.5 Classificações de regimes de operação do leito fluidizado

Após o processamento das imagens, foi iniciada a etapa de caracterização dos regimes de operação do leito com base nas imagens coletadas. Foram coletadas inúmeras imagens em quatro diferentes condições de operação do leito: leito fixo, leito expandido, fluidização mínima e fluidização leve. Foram observadas as características de fluidização em cada condição, tal como formação de bolhas e movimento das partículas. A partir desses dados foi possível caracterizar os regimes de operação para o equipamento em estudo.

4.6 Medição de vazão e queda de pressão

Com o intuito de validar a caracterização dos regimes de operação identificados, foram coletados dados de vazão e queda de pressão para cada regime. Como o equipamento de estudo utilizado nesse trabalho não dispõe de instrumento dedicado à medição de vazão, a coleta de dados se deu através de um método não convencional, que consiste em realizar a coleta de uma quantidade de líquido em determinado tempo cronometrado e a queda de pressão foi avaliada através de um medidor do tipo Tubo em U.

Os resultados obtidos para queda de pressão e vazão foram coerentes com o estudo apresentado por Kunii e Levenspiel (1991), apresentados no item 3.4 desse trabalho, possibilitando assim validar a caracterização dos regimes através da identificação do nível do leito por processamento de imagens.

4.7 Análise estatística

Tem-se um total de 1024 imagens para cada regime de operação. Para cada imagem, calculou-se o valor médio, a partir de um total de 39 medidas. Foi realizada então uma análise estatística dos resultados, com o cálculo de estatísticas descritivas e confecção de gráficos, e

com o teste de comparações múltiplas de Tukey-Kramer (HSU, 1996) com o objetivo de verificar a diferença entre as médias dos níveis entre os regimes de operação.

4.8 Aplicação da Transformada Rápida de Fourier

Aplicou-se a transformada rápida de Fourier com o propósito de identificar uma banda de frequência dominante para cada regime de operação, a fim de também ser usada para identificação dos regimes de operação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Processamento das imagens

Após as etapas iniciais de preparo do leito e de aquisição das imagens, iniciou-se a etapa subsequente de processamento de imagem. A primeira parte do processamento de imagens consiste em realizar a transformação da imagem colorida em escala de cinza.

Quando uma imagem é capturada, ela é representada como um sinal analógico na saída do dispositivo de aquisição e esse sinal deve ser submetido a uma amostragem, que converte a imagem analógica em uma matriz de $(X \times Y)$ pontos, cada qual denominado *pixel* (ou elemento de imagem). Essa transformação é necessária para que seja possível realizar o tratamento computacional adequado (FILHO; NETO, 1999). Em seguida, converteu-se a imagem para a escala de cinza, conforme a Figura 14.







Na sequência, foi realizado um redimensionamento da mesma, a fim de se exibir somente a coluna do leito, região de interesse de estudo. O resultado obtido após o redimensionamento pode ser visto na Figura 17.

Figura 17 - Imagem redimensionada.



Com a imagem redimensionada, foi aplicada a função "*imbinarize*" para binarizar a imagem. A etapa de binarização consiste em criar uma imagem binária a partir da imagem de origem, substituindo todos os valores acima de um limiar determinado globalmente por 1 e definindo todos os outros valores para 0. Por padrão, a função aplicada usa o método de Otsu, onde seu objetivo é, a partir de uma imagem em tons de cinza, determinar o valor ideal de um *threshold* que separe os elementos do fundo e da frente da imagem em dois *clusters*, atribuindo a cor branca ou preta para cada um deles. Devido a essa característica, funciona especialmente bem para casos de imagens com histogramas bimodais, podendo ser divididas adequadamente com um único valor (MATLAB[®], 2018). O resultado obtido para a imagem binarizada está representado na Figura 18.

Figura 18 - Imagem binarizada.

Para a caracterização dos regimes de operação do leito, foram necessários alguns ajustes com relação à borda das imagens binarizadas. Para isso, foram utilizados filtros para detecção de bordas. O primeiro filtro utilizado foi o filtro de Sobel.

O operador de Sobel usa uma máscara de convolução 3 x 3, uma estimativa de gradiente na direção *X* e outro gradiente de estimativa na direção *Y*. Como resultado, a máscara desliza sobre a imagem, manipulando um quadrado de *pixels* por vez. A máscara é deslizada sobre uma área em que a imagem de entrada muda com o valor desse *pixel* e, em seguida, desloca um *pixel* para a direita e continua para a direita até atingir o final da linha, que recomeça automaticamente no início da próxima linha (VINCENT; FOLORUNSO, 2009).

A partir da imagem binarizada, a Figura 19 apresenta o resultado desse filtro. Como pode ser observado, esse filtro não gerou um resultado satisfatório, realçando alguns pontos isolados da borda. Esse resultado é ocasionado devido à tentativa da redução dos ruídos, resultando em bordas borradas e distorcidas.

Figura 19 - Filtro de Sobel.



Também a partir da imagem binarizada, O segundo filtro utilizado foi o de Prewitt e a Figura 20 apresenta o resultado obtido. O filtro de Prewitt calcula o gradiente de intensidade da imagem em cada ponto, dando a direção do maior aumento possível do claro para o escuro e a taxa de mudança em qualquer direção. O gradiente de aproximação que ele produz é relativamente bruto, em particular para a alta frequência de variações na imagem. Este método é apropriado apenas para imagens sem ruído e bem contrastadas (LAKHANI *et al.*, 2016).





O último filtro utilizado foi o de Canny. Ele suaviza o ruído e localiza bordas, combinando um operador diferencial com um filtro Gaussiano, que é usado para suavizar a imagem removendo o ruído e melhorando a qualidade visual da imagem (LAKHANI *et al.*, 2016). O método Canny difere dos outros métodos de detecção de bordas, pois usa dois

limites diferentes (para detectar bordas fortes e fracas) e inclui as bordas fracas na saída somente se estiverem conectadas a bordas fortes. Este método é, portanto, menos provável do que os outros de ser prejudicado pelo ruído, e mais propenso a detectar verdadeiras bordas fracas (CANNY, 1986). A Figura 21 apresenta o resultado obtido com o filtro de Canny.





Porém, ao analisar as imagens processadas, foi constatado que as bordas de algumas imagens apresentavam formatos inadequados para realizar a medição de nível do leito fluidizado, como mostrado na Figura 22.



Figura 22 - Imagem com bordas inadequadas.

Para superar esse problema, a técnica de esqueletização foi aplicada pela primeira vez, com o objetivo de reduzir a borda analisada para uma cadeia simples, com largura de apenas um pixel. Logo após foi desenvolvido um algoritmo para correção da borda. O algoritmo desenvolvido realiza uma varredura da imagem na forma matricial, apagando as colunas que possuem mais de uma linha com *pixels* de valor 1, em seguida encontra-se os pares (x y) dos pontos restantes, que vão ter apenas um *pixel* de valor 1 em y para cada ponto em x, fazendo uma correção para não perder os primeiros e/ou últimos pontos da curva. Por fim realiza uma interpolação dos pontos apagados sem alterar os pontos que ficaram. A Figura 23 mostra a imagem resultante após aplicar o procedimento de correção de borda. Pode-se observar sua suavidade em relação à imagem anterior (Fig. 22).

Figura 23 - Imagem com correção de borda.



Com a borda das imagens corrigidas, foi inserida uma escala, representando a altura real do leito. Essa escala permitiu visualizar a altura em que a borda se encontrava. Para delimitar o trecho de estudo, o ponto zero (0) representa a altura mínima onde a imagem é capturada e o ponto 205, a altura máxima. O ponto zero está localizado 45 mm acima do distribuidor. A imagem com a escala é representada na Figura 24.

Figura 24–Esboço da imagem com escala.



5.2 Caracterização dos regimes do leito fluidizado

Definido o procedimento de processamento de imagem, foram coletadas várias amostras de imagens, em diversas condições operacionais do leito, possibilitando realizar a caracterização dos regimes de operação. Nessa direção, a válvula de entrada de fluido foi aberta e foi determinado visualmente o regime de operação do leito, baseado apenas na altura do leito, ou seja, sem a análise de outras variáveis do processo.

O leito é considerado fixo quando o fluido somente preenche os espaços vazios entre as partículas sólidas, sem provocar nenhuma alteração mais brusca entre as mesmas. O leito é expandido quando a vazão aumenta em pequena escala e causa um movimento restrito das partículas. A fluidização mínima ocorre quando há um aumento na velocidade do fluido, ocasionando a suspensão de todas as partículas e anulando a força vertical de compressão entre elas. Com um aumento na taxa de fluxo um pouco acima da velocidade de mínima fluidização, ocorre uma leve expansão do leito, caracterizando uma fluidização leve. A fluidização turbulenta ocorre quando há taxas de fluxo mais altas, onde o movimento das partículas se torna mais robusto, desaparecendo a superfície do leito e sendo perceptíveis pequenos arrastes de partículas.

O regime de operação, de acordo com a altura das esferas registradas pelas imagens, foi classificado de acordo com a Tabela 1.

Altura (mm)	Regime de operação
0 - 60,5	Leito fixo
60,5 - 71,0	Leito expandido
71,0 - 78,0	Fluidização mínima
78,0 - 95,5	Fluidização leve

Tabela 1 - Regime de operação baseado em altura.

Com o intuito de validar os resultados apresentados na Tabela 1, foram obtidos dados de vazão e de queda de pressão, para cada um dos regimes investigados.

Apesar do método de coleta de vazão não ser muito preciso, dados os desvios-padrão amostrais pequenos, é possível afirmar que todas as amostras apresentam uma confiabilidade estatística alta, visto que o desvio-padrão baixo indica se os valores dos conjuntos amostrais estão próximos à média (TRIOLA, 2005).

A queda de pressão foi obtida através do método de manômetro de tubo em "U", como pode ser visto na Figura 25, utilizado para medir a diferença de pressão entre dois fluidos.

Figura 25 - Manômetro de Tubo em U



 $\boldsymbol{P}_1 - \boldsymbol{P}_2 = (\boldsymbol{\rho}_m - \boldsymbol{\rho}) \cdot \boldsymbol{g} \cdot \boldsymbol{H}$ (7)

A diferença de pressão é obtida através da Equação 8, onde $P_1 - P_2$ é a diferença de pressão, ρ_m é a densidade do fluido manométrico, que nesse caso foi o utilizado o tetracloreto de carbono com densidade de 1590 kg/m³, ρ é a densidade do fluido, utilizado a água com densidade de 1kg/m³, g a aceleração da gravidade e H a altura da coluna deslocada.

A Figura 26 representa a relação da queda de pressão com a vazão obtida para cada tipo de regime.



Figura 26 - Curva da Queda de Pressão (Pa) versus Vazão de entrada de água (m³/s), no leito fluidizado

No primeiro intervalo do gráfico, tem-se a caracterização do leito fixo. Esse regime é caracterizado pela passagem do fluido entre as partículas, sem as retirá-las do repouso. Com um leve aumento da velocidade do fluido, algumas partículas começam a se mover em regiões restritas, tem-se um pequeno aumento na queda de pressão juntamente com a vazão, caracterizando assim o leito expandido no segundo intervalo do gráfico. No terceiro intervalo do gráfico tem-se a suspensão de todas as partículas, ponto conhecido como mínima fluidização. Apesar do leve aumento na velocidade do fluido, a queda de pressão não teve alteração perceptível. Com um aumento da velocidade acima da mínima fluidização, ocorre uma leve expansão no leito, caracterizando uma fluidização leve e como mostra o quarto intervalo da Figura 26, tem-se uma redução da queda de pressão do leito devido ao desprendimento de algumas partículas aglomeradas. A partir do quarto intervalo em diante, ocorre o que é chamado de transporte pneumático, ou seja, as partículas são arrastadas para fora do leito. Essas informações podem ser comprovadas pela Figura 5 (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

A Figura 27 representa a relação entre as informações de altura do nível do leito e dos seus dados de vazão volumétrica.





Com as informações obtidas, comprova-se que é possível realizar a identificação dos regimes de operação do leito através da identificação do nível (altura do leito).

É importante ressaltar que tais informações servem como referência apenas para o equipamento em estudo. A eficiência dos classificadores de leito fluidizado é dependente de vários parâmetros incluindo a diferença relativa nas propriedades do material (tamanho, densidade e forma), a composição da mistura binária, a velocidade do fluido de operação, a taxa de fluxo de sólidos na coluna de fluidização, a altura do leito e outros parâmetros geométricos do leito fluidizado (PALAPPAN; SAI, 2008).

5.3 Análise Estatística

Realizou-se, inicialmente, uma análise de estatística descritiva. Para tal, calcularam-se, a média, o desvio-padrão, e o coeficiente de variação, para cada regime de operação, conforme a Tabela 2. Pode-se observar, inicialmente, o aumento progressivo do valor médio do nível do leito, com o maior o grau de fluidização do leito. Também nessa direção, pode-se verificar a menor a dispersão, absoluta (via desvio-padrão) e relativa (via coeficiente de variação), das medidas. Por fim, ressalta-se um valor sempre inferior a 5% para o coeficiente de variação, o que reflete um processo estável, nesse caso, em relação à definição do regime de operação. A Figura 28 é a representação gráfica dessa tabela, a partir do gráfico de barras de erros e do conjunto de gráficos do tipo *box-plot*.

Regime de Operação	Código	Média	Desvio- Padrão	Coeficiente de Variação (%)
Leito Fixo	lf	115,98	1,88	1,62
Leito Expandido	le	130,82	1,28	0,981
Fluidização Mínima	fm	134,88	1,06	0,786
Fluidização Leve	fl	148,15	0,918	0,619

 Tabela 2 - Estatística descritiva.

Figura 28 - (a) Gráfico de barra de erros e (b) box-plots, dado o regime de operação.



(a)



Em seguida, plotou-se, em um gráfico único, os histogramas dos valores médios de cada regime de operação (Figura 29). Pode-se observar a não sobreposição entre eles, o que é importante para uma melhor definição dos regimes de operação. Além disso, a distribuição normal, pelo menos aproximadamente, é útil para um melhor reconhecimento das transições (não explorado neste trabalho) entre os regimes de operação, em caso de operação continua, conforme usualmente ocorre nas indústrias de processos. Em resumo, esse resultado significa que o valor médio, dado uma imagem, tende, de modo regular, a um valor único, característico para cada regime de operação.

Figura 29 - Histogramas dos regimes de operação.



Com o objetivo de comprovar as diferenças entre os valores médios dos regimes de operação, realizou-se, incialmente, a análise de variância. Dado o valor-p igual à zero (Tabela 3), conclui-se pela rejeição da hipótese nula H0 (de que as médias são iguais) e, portanto há diferença entre valores médios dos níveis dos regimes de operação. Visando identificar essas diferenças, realizou-se um teste de comparações múltiplas, a partir do teste de Tukey (HSU, 1996).

A Figura 30 mostra os intervalos de confiança das diferenças entre os valores médios, para cada par (combinação) possível entre regimes de operação. Pode-se verificar que todas as médias são diferentes entre si, considerando-se um nível de significância (α) de 5%. Conforme descrição anterior, esse resultado é importante para uma melhor definição de cada regime de operação. Essa característica é útil, por exemplo, no uso do valor médio do nível do

leito como a variável controlada em um sistema de controle do nível do leito, com a manipulação de sua vazão de entrada, de modo a se garantir maior eficiência e segurança operacional.

ANOVA Table					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Groups	534303.3	3	178101.1	552390.67	0
Error	1319.3	4092	0.3		
Total	535622.6	4095			

Tabela 3 - Análise de variância.

Figura 30 - Teste de Tukey de comparações múltiplas.



5.4 Aplicação da FFT

A Figura 31 representa o processo de geração dos sinais no tempo.



Utilizando o *software* MatLab®, foi desenvolvido um algoritmo que realiza a varredura de todas as imagens coletadas, sobrepondo-se uma sobre a outra, no espaço do tempo, possibilitando analisar a variação do nível e assim obter o valor médio do mesmo para cada regime de operação, juntamente com a variação no tempo.

A seguir serão apresentados e discutidos os dados obtidos para cada regime de operação.

5.4.1 Espectro de potência e variação do nível em função do tempo



Figura 32 – Espectro de potência para Leito Fixo

Figura 33 - Variação do nível em função do tempo para Leito Fixo





Figura 34 - Espectro de potência para Leito Expandido







Figura 36 - Espectro de potência para Mínima Fluidização

Figura 37 - Variação do nível em função do tempo para Mínima Fluidização





Figura 38 - Espectro de potência para Fluidização Leve

Figura 39 - Variação do nível em função do tempo para Fluidização Leve



Analisando os resultados obtidos para cada regime, foi possível observar que os espectros não demonstraram, de forma geral, picos característicos que possibilitassem caracterizar o tipo de regime de operação.

Devido aos resultados obtidos através do espectro de potência e a variação do nível em função do tempo não terem sido satisfatórios, foi aplicada a função de auto correlação, com o objetivo de identificar se a série de dados é aleatória ou possui alguma tendência ou sazonalidade.

Na Figura 40 temos o resultado da auto correlação referente ao regime Leito Fixo.

Todos os valores ficaram acima do limite superior estabelecido. Os cinco primeiros *lag's* apresentam valores mais altos, que decrescem gradativamente até o *lag* 11, onde se tem um pequeno aumento até o *lag* 15. A partir desse ponto é observado um leve decrescimento, tendendo a estabilização até o final, indicando que a série possui um comportamento tendencioso. Entretanto, o resultado da auto correlação para esse caso indica que existe informação no sinal de nível que não é ruído aleatório.

Figura 40 - Auto correlação Leito Fixo



As Figuras 41, 42 e 43 representam respectivamente a auto correlação dos regimes Leito Expandido, Mínima Fluidização e Fluidização Leve.









Figura 43 – Auto correlação Fluidização Leve



Observa-se que os três gráficos de auto correlação apresentam um comportamento similar, tendo sempre um valor alto no primeiro *lag*, seguido de uma variação senoidal no restante dos *lag's*, na maioria das vezes dentro dos limites inferior e superior. Tal comportamento indica que as séries de dados observadas possuem um comportamento aleatório.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As bordas das imagens foram corrigidas com a utilização de algoritmos de filtros de detecção de borda. Foi feito testes com os filtros de Sobel, Prewitt e Canny, o qual apresentou um resultado mais eficiente no que diz respeito a detectar bordas com mais precisão e menos ruídos, devido a sua propriedade de suavizar ruídos, gerando uma borda muito mais definida e condizente com o esperado.

Mesmo com o filtro adequado, foi necessária a correção de algumas imperfeições nas bordas distorcidas, através da técnica de esqueletização, que proporcionou resultados bastante precisos.

Após todas as imagens serem corrigidas e processadas, o regime de operação do leito foi identificado com base no nível máximo que as esferas de vidro atingiram. É importante ressaltar que, a leitura visual do regime de operação do leito é muito particular. Para este estudo foram seguidas as informações obtidas na literatura sobre comportamento de fases sólidas e líquidas para garantir que a identificação do regime de operação do leito fosse a ideal.

Para comprovar os resultados obtidos, foi feito uma análise de dados de vazão e queda de pressão, e de acordo com o gráfico gerado pelos dados coletados, a caracterização dos regimes em função do nível do leito se mostrou bastante condizente com as informações encontradas na literatura.

As técnicas utilizadas de FFT e auto correlação não se mostraram satisfatórias para caracterização dos regimes de operação, embora agregarem um maior número de informações e dados sobre o processo.

De maneira geral, o sistema desenvolvido, de medição de nível baseado em um sistema de visão computacional foi preciso e bastante robusto, pois foi possível caracterizar o regime de operação do leito em conformidade com o nível da borda das imagens, possibilitando atingir os objetivos desejados.

Este trabalho teve um artigo aprovado em um congresso internacional, *Congress of Mechanical Engineering* (COBEM).

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros que possam ser desenvolvidos a partir do presente trabalho:

- Operação contínua do leito, com o objetivo de verificar a inferência sobre o nível do leito a partir das distribuições dos regimes de operação.
- Desenvolver um novo equipamento de bancada com tubo central de vidro e disposto de sensores de pressão, medidor de vazão e válvulas proporcionais, para que seja possível desenvolver uma malha de controle de toda a operação.

- ACHARYA, T.; RAY, A. K. *Image processing: principles and applications*. John Wiley& Sons, Inc., Hoboken: New Jersey, 428 p., 2005.
- AJBAR, A.; MASRY, W.; ALI, E. Prediction of flow regimes transitions in bubble columns using passive acoustic measurements. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. v. 48, p. 101-110, 2009.
- ANGADI, S. A.; KAGAWADE, V. C.A robust face recognition approach through symbolic modeling of Polar FFT features. Pattern Recognition. v. 71, p. 235-248, 2017.
- BABAEI, B.; ZARGHAMI, R.; SOTUDEH-GHAREBAGH, R. Monitoring of fluidized beds hydrodynamics using recurrence quantification analysis. Aiche Journal, vol. 00, 2012.
- BAGAVAC, P.; OPARA, L. K.; DOMAZET, Z. *Infrared Thermography of Steel Structure by FFT*. Materials today: Proceedings. v. 12, p. 298-303, 2019.
- BECK, F. R; VIRANI, N.; MOHANTA, L.; SOHAG, F. A.; RAY, A.; CHEUNG, F. B. Study of vapor film dynamics and heat transfer through an image processing technique. International Journal of Heat and Mass Transfer.v.125, p. 1310-1320, 2018.
- BENALCÁZAR, F. D. C.; FRANKLIN, E. M. Plug regime in water fluidized beds in very narrow tubes. Powder Technology. Available, In press, 2019.
- BHARDWAJ, S.; MITTAL, A.A Survey on Various Edge Detector Techniques. Procedia Technology.v. 4, p. 220-226, 2012.
- BLUM, H. A transformation for extracting new descriptors of shape. Models Percept. Speech Vis. Form 19, p. 362–380, 1967.
- BOAVENTURA, I. A. G.; GONZAGA, A. Uma abordagem Fuzzy para Detecção de Bordas em Imagens Digitais. In: Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional (CNMAC), XXX, 2007, Florianópolis. Anais. São Carlos, SP: SBMAC, 2007. Disponível em: <www.sbmac.org.br/eventos/cnmac/xxx_cnmac/PDF/259.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2019.

- BORÉL, L. D. M. S. Estudo de aplicação da pirólise rápida em leito de jorro para valorização de resíduos agroindustriais. Tese (doutorado). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.
- BRIENS, C.L.; BRIENS, L.A., HAY, J.; HUDSON, C.; MARGARITIS, A. Hurst's analysis to detect minimum fluidization and gas mal distribution in fluidized beds. Aiche Journal, vol. 43, p. 1904–1908, 1997.
- BURKHARDT, H.; BREDEBUSCH, A. Application of digital image processing methods for the analysis of local structures in fluidized bed processes. Ed. J. Werther, H. Märkl, In-Situ Measuring Techniques and Dynamic Modeling for Multiphase Flow Systems, SFB 238 ProgressReport 1994–1996, Verlagdes SFB 238, Hamburg, p. 199–216, 1996.
- BUSCIGLIO, A.; VELLA, G.; MICALE, G.; RIZZUTI, L. Analysis of the bubbling behaviour of 2D gas solid fluidized beds. Chemical Engineering Journal, v.140, p. 398– 413, 2008.
- CANNY, J. A Computational Approach to Edge Detection. In: IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence, v.08, p. 679-698, 1986.
- CHLADEK, J.; JAYARATHNA, C. K.; MOLDESTAD, B. M. E.; TOKHEIM, L. A. *Fluidized bed classification of particles of different size and density.* Chemical Engineering Science, v. 177, p.151-162, 2018.
- COSTA, C. M. L. Caracterização e análise experimental do recobrimento de sementes de jambu (Spilanthes oleracea) em leito fluidizado. Tese (doutorado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 2010.
- CUNHA, R. L. G. Caracterização fluidodinâmica no recobrimento de celulose microcristalina em leito fluidizado. 2004. 106p. Dissertação (mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 2004.
- DAVIES, E. R. Computer Vision: Principles, Algorithms, Applications, Learning. Academic Press, University of London: United Kingdom, 5thed, 900 p., 2018.
- DOGAN, O. M.; FREITAS, L. A. P.; LIM, C. J.; GRACE, J. R.; LUO, B. *Hidrodynamics and* stability of slot-rectangular spouted beds. Chemical Engineering Communications. v.

181, p. 225 – 242,2000.

- FILHO, O. M.; NETO, H. V. Processamento Digital de Imagens. Rio de Janeiro: Brasport, 1999.
- FU, Y.; LIU, Y. Developmentof a robust image processing technique for bubbly flow measurement in a narrow rectangular channel. Chemical Engineering Science. v. 189, p. 1-23, 2018.
- GAMBLIN, B.; NEWTON, D.; GRANT, C. X-ray characterization of the gas flow patterns from FCC regenerator air ring nozzles. A.A. Avidan, Circulating Fluidized Bed Technology IV, Proc. 4th Int. Conf. Circulating Fluidized Beds, Somersetr/Pa., USA, p. 494–499, 1993.

GELDART, D.; ABRAHAMSEN, A. R. Homogeneous Fluidization of Fine Powder Using Various Gases and Pressures. Powder Technology, v. 19, p. 133-136, 1978.

- GELDART, D.; Gas Fluidization Technology. John Wiley & Sons, New York, 1986.
- GIBILARO, L. G. Fluidization Dynamics. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.
- GONÇALVES, L. A. Um estudo sobre a Transformada Rápida de Fourier e seu uso em processamento de imagens. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2004.
- GUPTA, S.; GUPTA, C.; CHAKARVARTI, S. K. Image Edge Detection: A Review. International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET). v. 2, p. 2246 - 2251, 2013.
- HAJIHOSSEINI, P.; ANZEHAEE, M. M.; BEHNAM, B. Fault detection and isolation in the challenging Tennessee Eastman process by using image processing techniques. ISA Transactions. v. 79, p. 137-146, 2018.
- HOLLERBACH, C. C. G.; MASSELLI, Y. M. C. Reconhecimento de falhas em processos industriais utilizando processamento digital de imagens via solução Open Source.
 Seminário de Automação Industrial e Sistemas Eletroeletrônicos – SAISEE (ISSN 2319-0280), Santa Rita do Sapucaí, Minas Gerais, 2015.

HSU, J.C. Multiple Comparisons, Theory and methods. Chapman & Hall, 1996.

- KHATCHATOURIAN, O.; PADILHA, F. R. R. Reconhecimento de variedades de soja por meio do processamento de imagens digitais usando redes neurais artificiais. Eng. Agrícola, Jaboticabal, v.28, p.759-769, 2008.
- KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. *Fluidization Engineering*. 2^a ed. Boston, Londres, Singapura, Sidney, Toronto, Wellington: Butter Worth Heinemann, 1991, 491p.
- LACKERMEIER, U.; RUDNICK, C.; WERTHER, J.; BREDEBUSCH, A.; BURKHARDT,
 H. Visualization of flow structures inside a circulating fluidized bed by means of laser sheet and image processing. Powder Technology. v. 114, p. 71-83, 2001.
- LAKHANI, K., MINOCHA, B., GUGNANI, N. Analyzing edge detection techniques for feature extraction in dental radiographs. Perspectives in Science 8, p.395-398, 2016.
- LI, X.; LIUA, M.; LI, Y. Hydrodynamic behavior of liquid-solid micro-fluidized beds determined from bed expansion. Particuology. v. 38, p. 103-112, 2018.
- LIUKKONEN, M.; HILTUNEN, T.; HILTUNEN, Y. Evaluation of fluidized bed condition by image analysis and modelling. IFAC – Papers On Line. v. 48, p. 892-897, 2015.
- LOURENÇO, R. O. *Identificação e monitoramento de regimes de escoamento em leito de jorro*. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.
- MARQUES, F. C.; Caracterização dos regimes de fluidização de partículas finas através da análise de flutuações de pressão no leito. Dissertação (Mestrado), UFU – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.
- MATHUR, N.; MATHUR, S.; MATHUR, D. A Novel Approach To Improve Sobel Edge Detector. Procedia Computer Science. v. 93, p. 431-438, 2016.
- MATLAB®. Image Processing Toolbox[™] User'sGuide. Disponível em: <https://www.mathworks.com/login?uri=https%3A%2F%2Fwww.mathworks.com%2F help%2Fpdf_doc%2Fimages%2Findex.html&context=behindmwa>. Acesso em 11 abril, 2018.

MATURANA, P. S. Algoritmos de detecção de bordas implementados em FPGA. Dissertação

(mestrado) – Universidade Estadual Paulista - UNESP, São Paulo, Ilha Solteira, 2010.

- NACEF, S.; PONCIN, S.; WILD, G. On set of Fluidization and Flow Regimes in Gas-Liquid-Solid Fluidization-Influence of the Coalescence Behavior of the Liquid. La Fluidization, C. Laguerieand P. Guigon, eds., Lavoisier Technique et Documentation, Paris, p. 359, 1991.
- NASCIMENTO, M. L. S.; GUIMARÃES, L. N. F; SHIGUEMORI, E. H. Aplicação de técnicas de processamento de imagens no reconhecimento de marcos em rodovias para treinamento de redes neurais artificiais. WORCAP Workshop de Computação Aplicada, INPE, 2012
- NEDELTCHEV, S. New methods for flow regime identification in bubble columns and fluidized beds. Chemical Engineering Science. v. 137, p. 436-446, 2015.
- OLIVEIRA, A. C. H., VIEIRA, J. W., LIMA, F. R. A. Implementação da fft para processamento de imagens digitais usadas na construção de fantomas de voxels. III Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica, Fortaleza, Ceará, 2008.
- PALAPPAN, K.G., SAI, P.S.T. Studies on segregation of binary mixture of solids in continuous fast fluidized bed: Part II. Effect of particle size. Chemical Engineering Journal. v. 139, p. 330-338, 2008.
- QUEIROZ, J. E. R.; GOMES, H. M. *Introdução ao Processamento Digital de Imagens*. Revista RITA: UFCG – Universidade Federal de Campina Grande. v. 8, p. 1-31, 2001.
- RAO, P. S.; YEDUKONDALU, K. Hardware implementation of digital image skeletonization algorithm using FPGA for computer vision applications. Journal of Visual Communication and Image Representation, v. 59, p. 140–149, 2019.
- RUDORFER, M.; KRÜGER, J. Industrial Image Processing Applications as Orchestration of Web Services. Procedia CIRP 76, 7th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems, Berlin, Germany, p. 144-148, 2018.

RUKMANI, P.; TEJA, G. K.; VINAY, M. S.; REDDY, B. P. R. Industrial monitoring using

image processing, IOT and analyzing the sensor values using big data. Procedia Computer Science. v. 133, p. 991-997, 2018.

RUSS, J.C. The Image Processing Handbook, 6th edition. CRC Press, Boca Raton, 2011.

- SAHA, P. K., BORGEFORS, G., SANNITI DI BAJA, G. A survey on skeletonization algorithms and their applications. Pattern Recognition Letters. v.76, p. 3–12, 2016.
- SEARA, D. M. Algoritmos para detecção de bordas. Dissertação Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1998.
- SHIRADO, W. H.; MOREIRA, M. A.; PALMA, J. G.; JÚNIOR, S. B. Estudo comparativo entre algoritmos das Transformadas Discretas de Fourier e Wavelet. Revista Brasileira de Computação Aplicada. v. 7, p. 97-107, 2015.
- TRIOLA, M. F. Introdução à estatística. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005. 696 p.
- VINCENT, R.; FOLORUNSO, O. A Descriptive Algorithm for Sobel Image Edge Detection. Proceedings of Informing Science & IT Education Conference (InSITE), p. 97-107, 2009.

WALKER, J. S. Fast Fourier Transforms, 2nd ed., CRC Press, 1996.

- WANG, L.; YAOC, H. W.; WU, Z. X.; LIANG, D. The application of image processing in the electrical fire physical evidence identification. Proceedia Engineering. v. 71, p. 57-64, 2014.
- WATANO, S.; FUKUSHIMA, T.; MIYANA, K. The use of ultrasonic techniques for the measurement and control of bed height in tumbling fluidized bed granulation. Advanced Powder Technology. v. 5, p. 119 – 128, 1994.
- WERTHER, J. Measurement techniques in fluidized beds. Powder Technology. v. 102, p. 15 -36, 1999.
- WIDYATAMA, A.; DINARYANTO, O.; DEENDARLIANTO, I. The development of image processing technique to study the interfacial behavior of air-water slug two-phase flow in horizontal pipes. Flow Measurement and Instrumentation. v. 59, p. 168-180, 2018.

WILLIS, A. J.; MYERS, L. A cost-efective fingerprint recognition system for use with low-

quality prints and damaged fingertips. Pattern Recognition. v. 34, p. 255-270, 2001.

- XU, J.; BAO, X.; WEI, W.; SHI, G.; SHEN, S.; BI, H. T.; GRACE, C. J.; LIM, C. J. Statistical and frequency analysis of pressure fluctuations in spouted beds. Powder Technology, V. 140, p. 141-154, 2004.
- YANG, J.; ZHU, J. A novel method based on image processing to visualize clusters in a rectangular circulating fluidized bed riser. Powder Technology, v. 254, p. 407-415, 2014.
- YOON, D. C.; MOL, A.; BENN, D. K.; BENAVIDES, E. *Digital Radiographic Image Processing and Analysis.* Dental Clinics of North America. v. 62, p. 341-359, 2018.
- ZHU, C.; YU, Q.; DAVE, R. N.; PFEIFFER, R. Gas fluidization characteristics of nanoparticle agglomerates. AICHE Journal. v. 51, p. 426–439, 2005.