



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Química

Alexander Luiz Fernando

**ANÁLISE WAVELET APLICADA A SINAIS DE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO EM
LEITO FLUIDIZADO**

CAMPINAS

2018

ALEXANDER LUIZ FERNANDO

ANÁLISE WAVELET APLICADA A SINAIS DE FLUTUAÇÃO DE
PRESSÃO EM LEITO FLUIDIZADO

*Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia Química da Universidade
Estadual de Campinas como parte dos
requisitos exigidos para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia Química*

Orientador: Prof. Dr. Guilherme José de Castilho

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A VERSÃO
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO
ALUNO ALEXANDER LUIZ FERNANDO E
ORIENTADA PELO PROF DR GUILHERME
JOSÉ DE CASTILHO

CAMPINAS

2018

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): CNPq, 830535/1999-3
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5340-2765>

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

F391a Fernando, Alexander Luiz, 1989-
Análise wavelet aplicada a sinais de flutuação de pressão em leito
fluidizado / Alexander Luiz Fernando. – Campinas, SP : [s.n.], 2018.

Orientador: Guilherme José de Castilho.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade
de Engenharia Química.

1. Leito fluidizado. 2. Transformada wavelet. 3. Processamento de sinais. I.
Castilho, Guilherme José de, 1983-. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Wavelet analysis applied to pressure fluctuation signal on fluidized bed

Palavras-chave em inglês:

Fluidized bed

Wavelet transform

Signal processing

Área de concentração: Engenharia Química

Titulação: Mestre em Engenharia Química

Banca examinadora:

Guilherme José de Castilho

Marco Aurélio Cremasco

Carlos Alexandre Moreira da Silva

Data de defesa: 21-06-2018

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

Dissertação de Mestrado defendida pelo aluno Alexander Luiz Fernando e aprovada em 21 de junho de 2018 pela banca examinadora constituída pelos doutores:

Prof.Dr. Guilherme José de Castilho

Prof.Dr. Marco Aurélio Cremasco

Prof.Dr. Carlos Alexandre Moreira da Silva

A ata de defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmico do aluno.

*A minha noiva, meus pais e meu irmão
que sempre estiveram ao meu lado.*

AGRADECIMENTOS

À minha família pelo apoio financeiro e por toda dedicação, carinho, amor e incentivo que me proporcionaram em todos estes anos.

Ao Prof. Dr. Guilherme José de Castilho pela orientação e ensinamentos que me guiaram para a conclusão desta Dissertação de Mestrado.

Ao Prof. Dr. Marco Aurélio Cremasco pelas valiosas discussões que foram de grande contribuição para a qualidade da Dissertação e pelo espaço no Laboratório de Processos em Meios Porosos para realização deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, pelo aceite e contribuições para este trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

À Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas pela oportunidade concedida.

Aos amigos que tive o prazer de conhecer durante o decorrer destes dois anos de trabalho no LPMP/FEQ-UNICAMP que me ajudaram nos momentos mais difíceis e que também tive o prazer de ajuda-los.

À secretaria do DEPro pela ajuda e informações concedidas.

RESUMO

O processo de fluidização gás-sólido é bastante difundido na indústria e dentre suas aplicações destacam-se o craqueamento catalítico do petróleo, secagem, recobrimento de fármacos e gaseificação de biomassa. Os processos são possíveis graças às particularidades da fluidização como a elevada área de contato entre o sólido particulado e o gás o que permite altas taxas de transferência de massa e calor. Por outro lado, há dificuldades na modelagem matemática de leitos fluidizados, devido ao seu comportamento não-linear, de forma que se torna indispensável o estudo dos fenômenos fluidodinâmicos que ocorrem durante um processo. Medidores de pressão diferencial são muito utilizados para quantificar condições fluidodinâmicas em um leito fluidizado além disso são comumente aplicados na indústria devido à robustez e baixo custo. O sinal de pressão por si só não fornece muitas informações a respeito da fluidização. Então utiliza-se técnicas de análise de sinais, as quais são, em geral, classificadas nos domínios do tempo, frequência e espaço de fases. Este trabalho objetivou analisar os sinais de pressão diferencial obtidos em um leito fluidizado para avaliar a qualidade do regime fluidodinâmico com duas partículas do tipo B (esferas de vidro e areia) e uma do tipo D (esferas de vidro) da classificação de Geldart através da transformada *wavelet*. Os sinais de pressão foram obtidos em um leito fluidizado cilíndrico no qual variou-se a velocidade do ar. Foi avaliada a melhor *wavelet* para decompor os sinais e encontrou-se a Daubechie de segunda ordem, cujo nível ótimo de decomposição foi dez para as partículas do tipo B e doze para tipo D. Em seguida verificou-se como a energia se distribui por estes níveis. Os gráficos de energia em função dos níveis de distribuição permitiram identificar as velocidades de mínima fluidização, as quais concordaram com os resultados das curvas de fluidização. Já os gráficos das energias em função da velocidade do gás permitiram identificar as transições de regimes fluidodinâmicos à medida que foram observadas inversões da energia predominante. Esses resultados foram comparados com um trabalho anterior que empregou as análises de Fourier e caos. De forma geral, a *wavelet* apresentou-se como uma ferramenta com grande potencial a ser explorada.

Palavras-chaves: *wavelet*, *energia*, *escoamento gás-sólido*, *regimes fluidodinâmicos*

ABSTRACT

The gas-solid fluidization process is very common in the industry with relevant applications such as the catalytic cracking of petroleum, drying, coating of drugs and gasification of biomass. The processes are possible due to the particularities of the fluidization as the high area of contact between the solid and the gas phases which allows high rates of transfer of mass and heat. On the other hand, there are difficulties in the mathematical modeling of fluidized beds, due to their non-linear behavior, therefore it becomes indispensable to study the fluid dynamics phenomena that occur during a process. Differential pressure measurements are widely used to quantify fluid dynamics conditions in a fluidized bed and are commonly applied in industry due to robustness and low cost. The pressure signal itself does not provide much information regarding fluidization. Then, signal analysis techniques are used, which are generally classified in the domains of time, frequency and phase space. This work aimed to analyze the differential pressure signals obtained in a fluidized bed to evaluate the quality of the fluid dynamics regime with two type B particles (glass and sand beads) and one type D (glass beads) of Geldart classification through wavelet transform. The pressure signals were obtained in a cylindrical fluidized bed in which the air velocity was varied. The best wavelet was evaluated to decompose the signals and the second order Daubechie's was found, whose optimal decomposition level was ten for type B particles and twelve for type D. It was verified how the energy is distributed by these levels. The graphs of energy as a function of the levels of distribution allowed obtaining the minimum fluidization velocity which agreed with the results found by the fluidization curve. Moreover, the graphs of the energies as a function of the gas velocity allowed identifying the transitions of fluid dynamics regimes by the inversions of the predominant energy. These results were compared with a previous work that used the Fourier and chaos analysis. In general, the wavelet presented itself as a tool with great potential to be exploited.

Keyword: wavelet, energy, gas-solid flow, fluid dynamics regimes

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1: Exemplos de propriedades de um fluido	24
Figura 2.2: Regimes de fluidização	27
Figura 2.3: Exemplo de um diagrama de perda de pressão em função da velocidade do gás	29
Figura 2.4: Obtendo a U_{mf} a partir do desvio padrão da variação de pressão.....	30
Figura 2.5: Classificação de Geldart	30
Figura 2.6: Formação de bolhas e aglomerados	32
Figura 2.7: Esquema representativo de um sistema de sonda de fibra óptica	34
Figura 2.8: Arranjos de fibra óptica (a) por transmissão (b) por reflexão	34
Figura 2.9: Tipos de sonda do arranjo reflexivo	35
Figura 2.10: Esquema de uma sonda de capacitância.....	36
Figura 2.11: Representação de um sensor LDV	37
Figura 2.12: Esquema da tomografia de raios-X em leito fluidizado	39
Figura 2.13: Esquema de utilização da técnica de ETC.....	40
Figura 2.14: Arranjo de detectores para rastreamento de partícula radioativa em leito fluidizado.....	41
Figura 2.15: Determinação da altura do leito expandido	45
Figura 2.16: Exemplo de séries temporais. Adquiridos para a partícula 1 (esferas de vidro do tipo B) (a) em leito expandido (b) em leito fluidizado	47
Figura 2.17: Representação do sinal $f(t)$ no domínio do tempo e no domínio da frequência.....	50
Figura 2.18: Exemplos de espectros de potência para os regimes (a) de múltiplas bolhas (b) simples (c) explosão de bolhas (d) transporte.....	51
Figura 2.19: Representação esquemática de uma reconstrução em duas dimensões	53
Figura 2.20: Entropia de Kolmogorov em função da velocidade superficial do gás para identificação de regimes em leito fluidizado	54
Figura 2.21: Exemplo da variação da dimensão de correlação em função da velocidade superficial do gás para identificação de regime fluidodinâmico.....	54
Figura 2.22: Comparação esquemática entre as técnicas de análise de sinal.....	56
Figura 2.23: Representação das funções elementares	59

Figura 2.24: Representação gráfica da compressão de uma <i>wavelet</i>	60
Figura 2.25: Deslocamento contínuo da <i>wavelet</i> no tempo.....	60
Figura 2.26: Processo de deslocamento e dilatação da DWT.....	63
Figura 2.27: Bloco de decomposição de sinal.....	65
Figura 2.28: Exemplo da decomposição em árvore.....	66
Figura 2.29: <i>Wavelet</i> Haar.....	68
Figura 2.30: <i>Wavelet</i> biortogonal.....	68
Figura 2.31: <i>Wavelet</i> Daubechies de segunda e terceira ordem.....	69
Figura 2.32: <i>Wavelet</i> Symlets de segunda e terceira ordem.....	69
Figura 2.33: <i>Wavelets</i> (a) Morlet e (b) <i>mexican-hat</i>	70
Figura 2.34: <i>Wavelet</i> Meyer.....	70
Figura 2.35: Esquema da resposta do leito a passagem do gás.....	71
Figura 2.36: Picos obtidos da escala 4 dos detalhes obtidos por Lu e Li (1999).....	72
Figura 2.37: Expoentes de Hurst da decomposição do sinal de porosidade utilizado por Ellis <i>et al.</i> (2003).....	73
Figura 2.38: Distribuição de energia relativa em função da velocidade superficial do gás utilizada por Jiang <i>et al.</i> (2012).....	75
Figura 2.39: Esquema de decomposição em três níveis da WP.....	76
Figura 2.40: Plot dos coeficientes da WP para (a) regime de explosão de bolhas (b) regime de bolhas simples.....	76
Figura 3.1: Esquema do leito fluidizado experimental.....	79
Figura 3.2: Procedimento para encontrar o nível ótimo de decomposição.....	83
Figura 3.3: Fluxograma da metodologia para aplicação da transformada <i>wavelet</i>	85
Figura 4.1: Curva de fluidização da partícula 1.....	85
Figura 4.2: Curva de fluidização da partícula 2.....	85
Figura 4.3: Curva de fluidização da partícula 3.....	86
Figura 4.4: Gráfico log-log para determinação da U_{mf} para partícula 1.....	89
Figura 4.5: Gráfico log-log para determinação da U_{mf} para partícula 2.....	89
Figura 4.6: Gráfico log-log para determinação da U_{mf} para partícula 3.....	89
Figura 4.7: Desvio padrão da partícula 1.....	89
Figura 4.8: Desvio padrão da partícula 2.....	90
Figura 4.9: Desvio padrão da partícula 3.....	91
Figura 4.10: Sinais de pressão referentes a partícula 1 (a) 0,052; (b) 0,061; (c) 0,069; (d) 0,078; (e) 0,260; (f) 0,346 m/s.....	92

Figura 4.11: Sinais de pressão referentes a partícula 2 (a) 0,043; (b) 0,217; (c) 0,390; (d) 0,433; (e) 0,520; (f) 0,606 m/s.....	93
Figura 4.12: Sinais de pressão referentes a partícula 3 (a) 0,017; (b) 0,043; (c) 0,052; (d) 0,061; (e) 0,078; (f) 0,087 m/s.....	94
Figura 4.13: Erro absoluto em função da velocidade da partícula 1.....	95
Figura 4.14: Erro absoluto em função da velocidade da partícula 2.....	96
Figura 4.15: Erro absoluto em função da velocidade da partícula 3.....	97
Figura 4.16: Erro absoluto em função do nível de decomposição para a partícula 1	97
Figura 4.17: Erro absoluto em função do nível de decomposição para a partícula 2	97
Figura 4.18: Erro absoluto em função do nível de decomposição para a partícula 3	98
Figura 4.19: <i>Wavelet energy Shannon entropy</i> em função das aproximações para a partícula 1.....	99
Figura 4.20: <i>Wavelet energy Shannon entropy</i> em função das aproximações para a partícula 2.....	99
Figura 4.21: <i>Wavelet energy Shannon entropy</i> em função das aproximações para a partícula 3	99
Figura 4.22: Energias relativas para a partícula 1 em função do nível de decomposição	101
Figura 4.23: Energia relativa da partícula 1 em função da velocidade	102
Figura 4.24: Energia relativa da partícula 2 em relação ao nível de decomposição	105
Figura 4.25: Energia relativa da partícula 2 em relação a velocidade	104
Figura 4.26: Energia relativa da partícula 3 em função do nível de decomposição.....	107
Figura 4.27: Energia relativa da partícula 3 em função da velocidade	108
Figura A1: Histogramas da distribuição de partículas (a) partícula 1, (b) partícula 2, (c) partícula 3.....	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Janelas de frequência associadas a cada sub-nível.....	67
Tabela 3.1:Caracterização das partículas	78
Tabela 3.2:Velocidades fixadas para cálculo do erro em função do nível de decomposição	82
Tabela 4.1: Velocidades de mínima fluidização experimentais a partir das curvas de fluidização	87
Tabela 4.2: Velocidades de mínima fluidização experimental a partir do desvio padrão	89
Tabela 4.3: Séries temporais selecionadas.....	91
Tabela 4.4: Observações experimentais dos regimes obtidas por Castilho <i>et.al.</i> (2011) para as mesmas séries temporais	103

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Resumo das técnicas de medida não intrusivas.....	36
Quadro 2.2: Resumo das técnicas de medida intrusivas.....	43

Nomenclatura

Abreviações

CWT	Transformada <i>wavelet</i> contínua (<i>Continuous wavelet transform</i>)
DWT	Transformada <i>wavelet</i> discreta (<i>Discrete wavelet transform</i>)
ECT	<i>Electrical Capacitance Tomography</i>
FCC	<i>Fluid Catalytic Cracking</i>
LDA	<i>Laser Doppler Anemometry</i>
LDV	<i>Laser Doppler Velocimetry</i>
MIT	<i>Massachusets Institute of Thechnology</i>
PDF	<i>Probabilit Density Distribution Function</i>
RPT	<i>Radioactive Particle Tracking</i>
STFT	<i>Short Time Fourier Transform</i>
UCM	Universidade Complutense de Madri
UV	Radiação Ultravioleta
WEE	<i>Wavelet Energy Shannon Entropy</i>
WT	Transformada <i>wavelet</i>

Letras maiúsculas

A_t	Área transversal do leito	[m ²]
Ar	Número de Arquimedes	[-]
CT	Número CT normalizado	[-]
D	Dimensão de correlação	[-]
E	Energia do sinal de pressão	[Pa ²]
E_T	Energia total	[Pa ²]
F	Coefficiente de achatamento	[-]
K	Entropia de Kolmogorov	[bit/s]

K_e	Constante dielétrica relativa da suspensão sólido-fluido	[-]
K_f	Constante dielétrica relativa do fluido	[-]
K_p	Constante dielétrica relativa do sólido	[-]
L	Altura do leito	[m]
L_{mf}	Altura do leito na condição de mínima fluidização	[m]
L_{rx}	Caminho percorrido pela radiação	[m]
N	Número de pontos da série temporal	[-]
W	Força peso	[N]
U	Velocidade do gás	[m/s]
U_{mf}	Velocidade de mínima fluidização	[m/s]
Re	Número de Reynolds	[-]
R	Energia relativa	[%]
S	Coeficiente de achatamento	[-]

Letras minúsculas

a	Coeficiente da <i>wavelet</i> relacionado a escala	[-]
b	Coeficiente da <i>wavelet</i> relacionado a posição	[-]
c_v	Concentração volumétrica de sólidos	[-]
d_p	Diâmetro de partícula	[m]
f_s	Frequência de amostragem	[Hz]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
m	Número de dimensões	[-]
t	Tempo	[s]
$x(t)$	Série temporal	[-]
$\hat{x}(t)$	Reconstrução da série temporal	[-]

p_k Distribuição de probabilidade [-]

Letras Gregas

Δ Variação [-]

Δp_b Queda de pressão no leito [Pa]

ε Porosidade do leito [-]

ε_{mf} Porosidade de mínima fluidização [-]

Φ_s Esfericidade da partícula [-]

μ Viscosidade do gás [Pa.s]

μ_{rx} Coeficiente de atenuação linear [-]

μ_w Coeficiente de atenuação linear da água [-]

ρ_g Massa específica do gás [kg/m³]

ρ_s Massa específica da partícula [kg/m³]

ρ_b Massa específica aparente da partícula [kg/m³]

σ Desvio padrão [-]

τ Tempo de atraso ou passo de reconstrução [s]

Sumário

RESUMO.....	7
ABSTRACT	8
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	9
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE QUADROS	12
Nomenclatura.....	13
1. Capítulo 1 - Introdução.....	18
1.1 Introdução	18
1.2 Objetivos	21
1.2.1 Objetivos Gerais	21
1.2.2 Objetivos Específicos.....	21
1.3 Organização da dissertação.....	22
2. Capítulo 2 - Revisão bibliográfica.....	23
2.1 Aspectos gerais da fluidização.....	23
2.1.1 Fluidodinâmica do escoamento gás-sólido e regimes de fluidização.....	26
2.1.2 Velocidade de mínima fluidização e diagrama de pressão	28
2.1.3 Caracterização e classificação de partículas	30
2.2 Técnicas de medida	32
2.2.1 Medidores intrusivos	33
2.2.2 Medidores não-intrusivos	37
2.2.3 Medidores de pressão diferencial	44
2.3 Métodos aplicados em análise de sinais	46
2.3.1 Análise no domínio do tempo.....	47
2.3.2 Análise no domínio da frequência	49
2.3.3 Análise no espaço de fases	52
2.4 Transformada <i>wavelet</i>	55

2.4.1	Aplicações da transformada de <i>wavelet</i>	56
2.4.2	Representação dos sinais.....	58
2.4.3	Transformada <i>wavelet</i> contínua (CWT)	59
2.4.4	Transformada <i>wavelet</i> discreta (DWT).....	61
2.4.5	Representação multiresolução.....	63
2.4.6	Famílias de <i>wavelets</i>	67
2.4.7	Transformada <i>wavelet</i> aplicada à identificação de regimes fluidodinâmicos	70
3.	Capítulo 3 - Material e Métodos	78
3.1	Material	78
3.2	Sistema experimental.....	78
3.3	Métodos	80
4.	Capítulo 4 - Resultados e Discussões	85
4.1	Curva de fluidização.....	85
4.2	Velocidades de mínima fluidização	86
4.3	Desvio padrão das flutuações de pressão	89
4.4	Flutuações de pressão	91
4.5	Erro em da reconstrução dos sinais pela transformada <i>wavelet em</i> função da velocidade.....	94
4.6	Erro em função do nível de decomposição	96
4.7	Uso da entropia para escolha do nível de decomposição	98
4.8	Análise da distribuição da energia relativa nas decomposições para classificação de regimes.....	100
5.	Capítulo 5 - Conclusões e Sugestões	109
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	110
6.	Capítulo 6 - Referências Bibliográficas	111
	Anexo A.....	119

Capítulo 1 - Introdução

1.1 Introdução

A fluidização é a operação unitária em que sólidos granulares são suspensos por um fluido (gás ou líquido). Este processo tem como característica o contato íntimo entre a fase sólida e fluida e, conseqüentemente, haverá boa capacidade de transferência de massa e energia. Assim, pode-se observar comportamentos próximos ao isotérmico mesmo em reações altamente exotérmicas. Também são favorecidas operações de mistura, dispersões de líquidos e flexibilidade no tratamento de partículas com propriedades diversas (TEBIANIAN *et al.*, 2016).

As características dos leitos fluidizados favorecem uma série de aplicações na indústria química. As unidades de craqueamento catalítico em refinarias são as mais conhecidas, mas se pode citar o tratamento de minérios, reações de oxidação, secagem, recobrimento de fármacos e a gaseificação e torrefação de biomassa (NITZ; GUARDANI, 2008).

Apesar das diversas aplicações e extensiva literatura sobre leitos fluidizados seu comportamento é complexo. Os modelos fluidodinâmicos computacionais, em geral, são de difícil solução. Dentre os fatores que complicam a modelagem destacam-se os diversos regimes de fluidização, complexa interação gás-sólido, turbulências, aglomerações e formação de canais preferências. Além disso, os leitos usados industrialmente podem ter dezenas de metros de diâmetro e de altura, operam em altas temperaturas e pressões, e a geometria do equipamento pode ser complexa. Por esses motivos o design e *scale-up* de leitos fluidizados é um desafio (DUBRAWSKI *et al.*, 2013).

Parâmetros fluidodinâmicos como velocidade local de partícula e concentração de sólidos estão intimamente ligados ao desempenho das operações em leito fluidizado (ZHAO; YANG, 2003). Em uma reação essa concentração está relacionada com a área de contato entre reagente e catalisador, por exemplo. Da mesma forma, nas operações com troca térmica, o coeficiente de transferência de calor depende da concentração de sólidos e de sua variação temporal. Por isso é importante conhecer o comportamento fluidodinâmico do leito, tanto para o

desenvolvimento de projetos como na validação de modelos computacionais (WERTHER, 1999).

Como visto, conhecer a fluidodinâmica dos leitos fluidizados é essencial para se obter bons resultados em sua aplicação. Uma das maneiras de avaliar a fluidodinâmica é pela utilização de diversos tipos de medidores capazes de obter informações como concentração de partículas, velocidade, tamanho, umidade e regime fluidodinâmico. Entre eles pode-se citar o uso de tomografia de capacitância computadorizada, tomografia de raios-X, tomografia de raios γ , sondas de fibra óptica, sondas de capacitância, transdutores de pressão e medidores acústicos (VAN OMMEN; MUDDE, 2008).

A vantagem em usar sondas de pressão é a fácil aquisição de dados, mesmo em condições mais severas de operação como aquelas encontradas nas aplicações industriais. Outras vantagens são: 1) os sensores de pressão são robustos; 2) são baratos; 3) não são invasivos, o que evita interferência na dinâmica dentro do leito (SASIC; LECKNER; JOHNSON, 2007).

A análise de sinais de pressão auxilia na interpretação da fluidodinâmica do leito, pois a simples visualização de uma série temporal é de difícil interpretação. Existem diversos tipos de análises aplicadas a séries temporais, as quais podem ocorrer no domínio do tempo, da frequência e do espaço de fases (JOHNSON *et al.*, 2000).

No domínio do tempo pode-se citar as análises estatísticas como média e desvio padrão. No domínio da frequência a técnica mais utilizada é a análise espectral que emprega a transformada de Fourier. Já no espaço de fases aplica-se os atratores caóticos e seus quantificadores como a entropia de Kolmogorov e a dimensão de correlação.

A análise empregando a transformada de *wavelet* permite a representação do sinal simultaneamente no domínio do tempo e da frequência. Uma vez que a fluidização é um fenômeno em múltiplas escalas, sinais são tipicamente medidos em três faixas de frequências: 1) alta frequência associada ao movimento de partículas; 2) média frequência associada à aglomeração de partículas; 3) baixas frequências que quantificam a formação e movimento dos vazios. Este tipo de análise tem a capacidade de, naturalmente, separar estes três bandas de frequência

facilitando a obtenção de informações a respeito do comportamento do leito (VAN OMMEN *et al.*, 2011).

Além disso os grupos de pesquisa na Faculdade de Engenharia Química (FEQ) da Unicamp detêm um histórico na área de análise de sinais aplicados em sistemas particulados. CASTILHO (2007) realizou análises no domínio do tempo em termos de distribuição de probabilidade e de desvio padrão em sinais de sonda de fibra óptica em leito fluidizado circulante (LFC). FELIPE e ROCHA (2007) analisaram a determinação da velocidade de mínima fluidização para diversas partículas através do desvio padrão. PARISE (2007) identificou o fenômeno da defluidização utilizando a transformada de Fourier juntamente com a distribuição exponencial gaussiana. FELIPE e ROCHA (2004) estudaram os diferentes regimes de fluidização pela análise espectral aplicada a sinais de flutuações de pressão. Ainda utilizando análises no domínio da frequência, SCATENA *et al.* (2017) verificaram a aplicação da análise espectral tanto experimentalmente como em resultados oriundos de modelos CFD (do inglês *Computational Fluid Dynamics*). CASTILHO (2011) ampliou seu trabalho com LFC e sondas de fibra óptica aplicando a análise do caos para descrever a fluidodinâmica e relacionar parâmetros como a entropia de Kolmogorov com fenômenos físicos, por exemplo, a formação de *clusters*. PRIETO e CREMASCO (2015) aplicaram a teoria do caos a sinais de variação de pressão em leito fluidizado com partículas do tipo A da classificação de Geldart a fim de associar os invariantes caóticos (entropia de Kolmogorov e dimensão de correlação) com os regimes fluidodinâmicos. Por fim SCATENA (2018) aplicou a análise caótica em séries temporais simuladas e experimentais revelando a capacidade dos modelos em representar a complexidade fluidodinâmica de um leito fluidizado. Uma referência que está diretamente ligada ao assunto desta dissertação é o trabalho de SILVA (2015), que estudou o controle e monitoramento de um leito fluidizado aplicado ao recobrimento de partículas utilizando a análise *wavelet* como uma das técnicas para identificar a defluidização do leito tanto *online* como *off-line*.

Diversos autores reconheceram as vantagens da análise *wavelet* em caracterizar a fluidização e estudar os regimes de transição. Os autores LI (2000) e ELLIS *et al.* (2004) mostraram a capacidade da transformada *wavelet* em filtrar bandas de frequências em diferentes níveis. YANG e LEU (2008) usaram esta técnica para caracterizar os padrões de fluxo em uma válvula através dos sinais

obtidos ao se observar as flutuações de pressão. Dois trabalhos investigaram a formação de bolhas em leito fluidizado usando a transformada *wavelet* (SASIC; LECKNER; JOHNSON, 2006; YURONG *et al.*, 2004). TAHMASEBPOUR, ZARGHAMI e MOSTOUFI (2013) estudaram os sinais de pressão de diferentes formas, comparando a transformada *wavelet* discreta (DWT) com outras duas abordagens. TAMADONDAR *et al.* (2014) aplicaram análises no domínio tempo-frequência para caracterizar o comportamento de nano partículas durante a fluidização.

Como verificado, existe uma ampla lista de trabalhos que utilizam análise *wavelet* para interpretar a dinâmica de leitos fluidizados. Aliado ao histórico de aplicações em análise de sinais dos grupos de pesquisa da FEQ, este tema serviu como motivação para o desenvolvimento desta dissertação. Entende-se que a transformada *wavelet* pode ser mais explorada ao comparar seus resultados e aplicabilidade com outras técnicas robustas como a análise espectral e caótica.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral desta Dissertação é identificar os distintos regimes de fluidização de um leito fluidizado gás-sólido a partir da transformada *wavelet* aplicada a flutuações de sinais de pressão. Os sinais utilizados são oriundos do trabalho de CASTILHO *et al.* (2011).

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta Dissertação são os seguintes:

1. tratamento dos sinais de pressão diferencial, obtidos por CASTILHO *et al.* (2011), para partículas distintas (classificadas em B e D de acordo com Geldart) a fim de corrigir o número de pontos e frequência de amostragem;
2. construção das curvas de fluidização para obter parâmetros de mínima fluidização a partir de métodos gráficos;

3. análise dos sinais no domínio do tempo a fim de obter valores de média, desvio padrão e identificação da U_{mf} ;
4. aplicar a transformada *wavelet* para avaliar as transições de regime;
5. obter o nível ótimo de decomposições utilizando a *Wavelet Energy Shannon Entropy* (WEE);
6. análise crítica dos espectros a fim de identificar padrões correspondentes a transições nos regimes de fluidização e seus respectivos fenômenos;
7. análise comparativa com os resultados obtidos pela análise do caos para este mesmo conjunto de sinais;

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação é dividida em seis capítulos organizados da seguinte maneira:

- No Capítulo 1 são apresentadas as motivações que levaram ao desenvolvimento deste trabalho, seus objetivos gerais e específicos.
- No Capítulo 2 consta a revisão bibliográfica responsável por contextualizar o tema.
- Os materiais utilizados, os métodos experimentais empregados e a técnica de tratamento de dados estão descritos no Capítulo 3.
- Em seguida, no Capítulo 4, são apresentados os resultados e discutidas suas implicações.
- No Capítulo 5 conclui-se a dissertação e são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.
- Por fim, o Capítulo 6 apresenta as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

Capítulo 2 - Revisão bibliográfica

A contextualização do trabalho foi feita de forma a contemplar as características da operação unitária de fluidização abrigoando sua importância para a indústria e suas aplicações. Em segundo lugar, este capítulo trata da importância do estudo fluidodinâmico do processo, uma vez que a velocidade de partícula e porosidade do leito são aspectos relevantes para um leito fluidizado. Em terceiro, as técnicas de medidas para se obter estes dados, com ênfase nos transdutores de pressão são abordados. Por fim, metodologias para o tratamento de sinais com objetivo de identificar regimes fluidodinâmicos, destacando a análise com a transformada do tipo *wavelet* são discutidos.

2.1 Aspectos gerais da fluidização

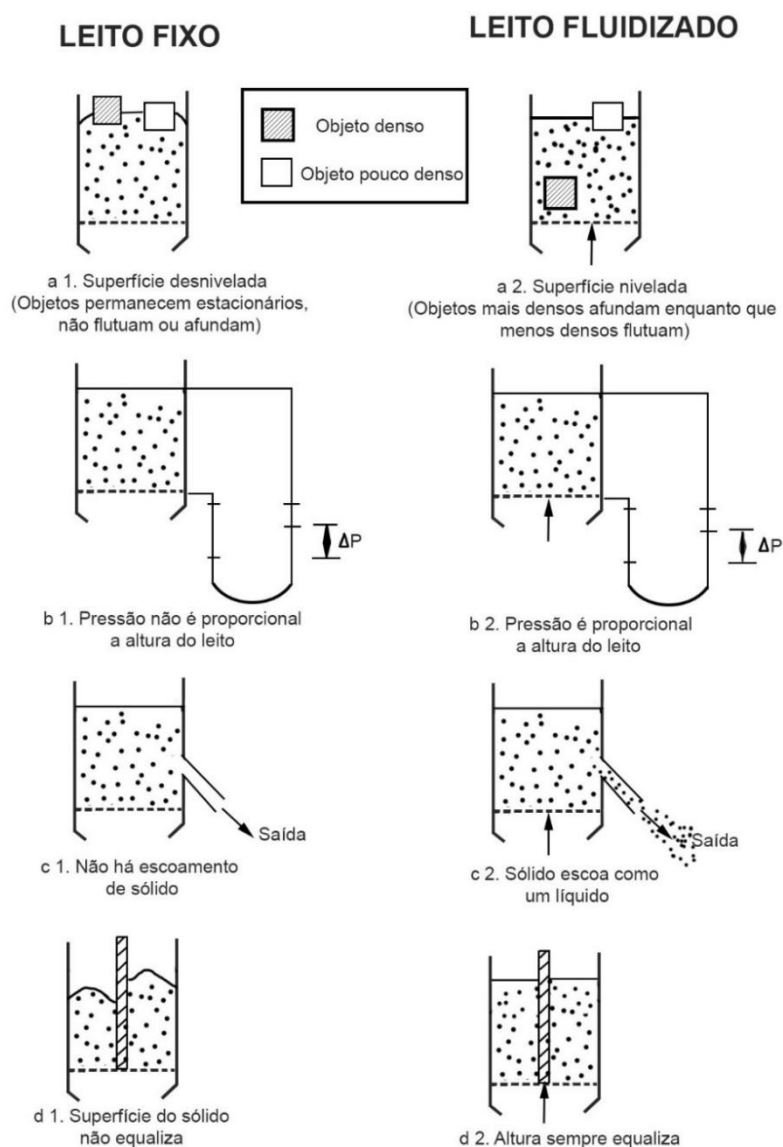
Fluidização pode ser basicamente descrita como um operação unitária na qual um sólido particulado é disposto sobre uma placa de distribuição através da qual escoo gás ou líquido e, acima de um certo fluxo crítico, o sólido se comporta como um fluido (GUPTA; SATHIYAMOORTHY, 1999). Entretanto a total compreensão deste processo não é simples como sua definição, uma vez que os complexos mecanismos de interação fluido-partícula não são completamente entendidos e a quantificação de sua fluidodinâmica é ainda mais difícil (LI *et al.*, 1998).

Diversas situações podem ocorrer em uma coluna que contenha um material particulado. O acontecimento mais simples de se imaginar é quando não há escoamento de um fluido no leito e as partículas permanecem estáticas. Já quando se permite que um gás ou líquido escoo de forma ascendente a estrutura permanece quase inalterada até que a velocidade de mínima fluidização é atingida. A partir desta a força de arraste supera a gravitacional e o sólido particulado adquire as propriedades de um fluido. Este fato pode ser constatado por propriedades simples de um fluido, como a capacidade de flutuação de um objeto de massa específica menor, variação proporcional da pressão com a altura e capacidade de escoamento (Figura 2.1) (GUPTA; SATHIYAMOORTHY, 1999).

Os materiais particulados com estas características de fluido trazem diversas vantagens para a operação industrial. Alguns exemplos dos benefícios em

se operar um leito fluidizado são: 1) a capacidade de escoamento das partículas permite operações em regime contínuo assim como o controle automatizado destas; 2) a grande capacidade de mistura leva o leito a trabalhar próximo ao comportamento isotérmico, conseqüentemente a operação deste torna-se mais simples; 3) a característica anterior também evita mudanças bruscas de temperatura, assim dificilmente perder-se-ia o controle de uma reação química exotérmica; 4) o leito fluidizado pode ser usado em operações em larga escala; 5) devido à grande área de contato entre o material particulado e o fluido as taxas de transferência de massa e calor são bastante elevadas quando comparadas a outros métodos de mistura (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Figura 2.1: Exemplos de propriedades de um fluido



Fonte: Adaptado de (GUPTA; SATHIYAMOORTHY, 1999)

Apesar das vantagens descritas, toda operação tem suas desvantagens. Dentre elas pode-se citar: 1) a dificuldade de descrever o fluxo de gás em situações que o regime se distancia do escoamento pistonado, como em leitos borbulhantes; 2) a mistura rápida das partículas acarreta em um tempo de residência não uniforme, especialmente em reações de alta conversão; 3) erosão dos componentes devido à abrasão das partículas sólidas; 4) o material particulado pode sofrer quebras com o tempo e conseqüentemente mudar as características fluidodinâmicas do leito; 5) Pode ocorrer aglomeração ou sinterização do material (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Devido às peculiaridades apresentadas é que o leito fluidizado vem sendo usado há décadas pela indústria nas mais diversas aplicações. É de consenso geral que o pioneirismo deste processo se deu em 1922 por Fritz Winkler com uma planta de gaseificação de carvão mineral. Durante a Segunda Guerra Mundial a necessidade de se produzir grandes quantidade de gasolina de aviação fez com que uma empresa americana desenvolvesse um processo de craqueamento catalítico do querosene em regime de transporte pneumático. Este processo apresentava diversos problemas mecânicos, foi então que professores do MIT (*Massachussets Institute of Thechnology*) sugeriram o uso de um leito fluidizado combinado com linhas de transporte pneumáticas. No final de 1943 este processo foi ainda mais aprimorado com o uso da fluidização borbulhante. Ainda na década de 40 foram feitas experiências na produção de combustível líquido a partir de monóxido de carbono e hidrogênio, processo conhecido como síntese Fischer-Tropsch (THOBER, 1995).

Esse sucesso inicial possibilitou a aplicação de leitos fluidizados em diversas áreas como em trocadores de calor, solidificação para produção de grânulos, recobrimento de metais com plásticos, secagem de partículas sólidas diversas (por exemplo, fármacos, sementes, inorgânicos como dolomita, entre outros), crescimento de partículas, processos de adsorção, reatores de síntese, reatores catalíticos (com destaque para a indústria de processamento de petróleo e os FCC), combustão e incineração, tratamento de resíduos, carbonização e gaseificação (KUNII; LEVENSPIEL, 1991). Além disso há aplicações em tecnologias emergentes como a captura de dióxido de carbono (CO₂), oxidação fotocatalítica por

UV e produção de silício de pureza elevada para ser utilizado na indústria de energia solar (TEBIANIAN, 2015).

2.1.1 Fluidodinâmica do escoamento gás-sólido e regimes de fluidização

Leitos fluidizados com gás tem comportamento distintos daqueles fluidizados por líquidos, principalmente quando a velocidade do gás é elevada acima daquela necessária para produzir uma fluidização incipiente. Até esta velocidade, o comportamento do leito, em geral, é pouco distinto em função do tipo de fluido, uma vez que este comporta-se como um leito fixo em ambos os casos. Entretanto em velocidades além da fluidização incipiente, o leito líquido-sólido irá se expandir de maneira uniforme até que as partículas sejam carregadas para fora do mesmo. Por outro lado, nos sistemas gás-sólido essa expansão não é uniforme e formam-se instabilidades na forma de bolhas (HOWARD, 1989).

Se um fluido ascendente passa através de finas partículas a baixa velocidade, o líquido ou gás vai apenas percorrer pelos espaços vazios entre as partículas estacionárias caracterizando o leito fixo (Figura 2.2.a). Com o aumento do fluxo, as partículas começam a se movimentar em uma região restrita, o que determina o estado leito expandido (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

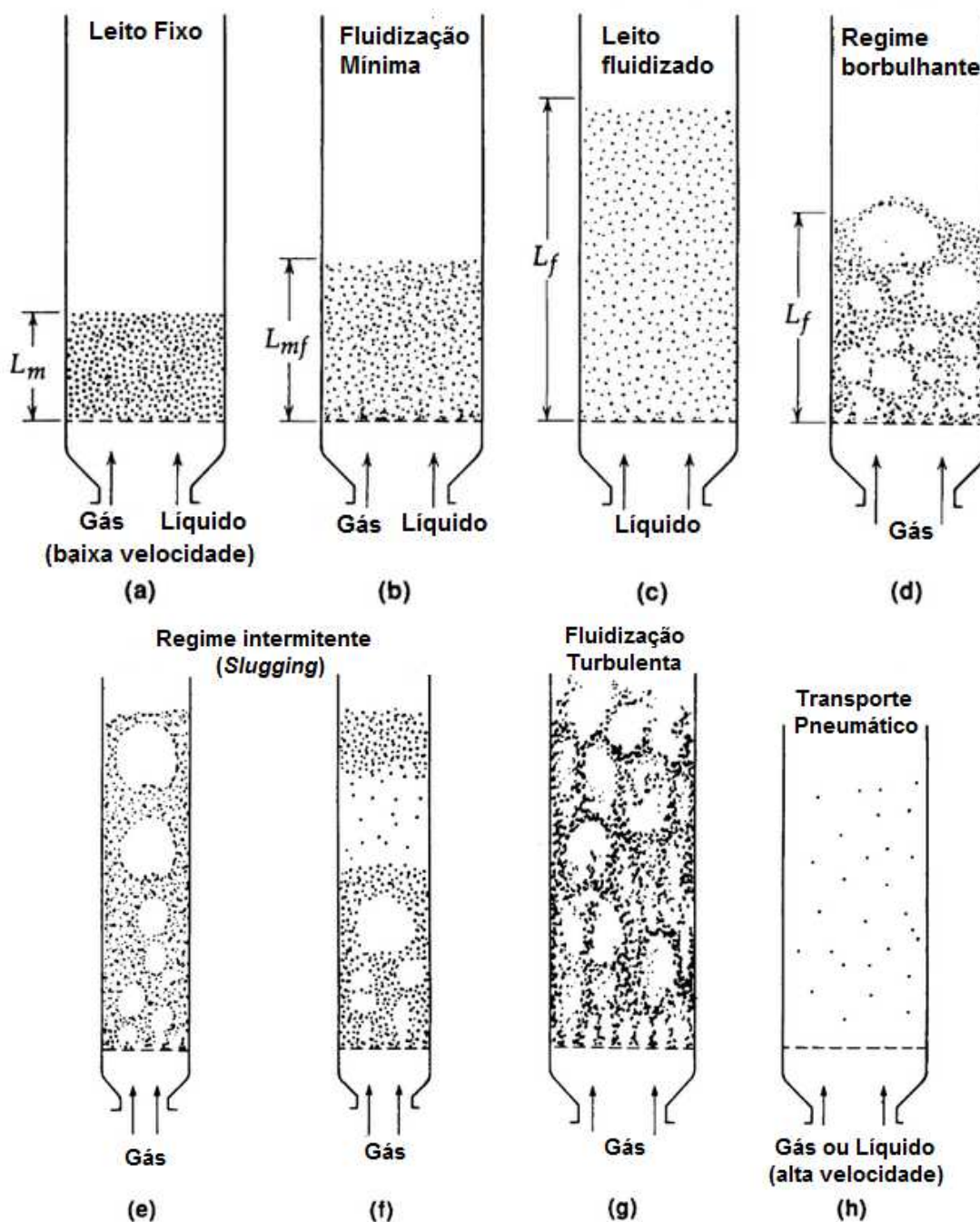
Para velocidades ainda maiores há um ponto em que as partículas estão suspensas pelo gás ou líquido, uma vez que as forças de interação entre o fluido e a partícula se equilibram caracteriza-se a fluidização mínima (Figura 2.2.b). Como dito anteriormente nos leitos líquido-sólido o aumento do fluxo leva a uma expansão progressiva do leito o que é representado na Figura 2.2.c.

Quando o fluxo excede aquele necessário para a mínima fluidização há o aparecimento de instabilidades como bolhas e o leito não se expande em grandes proporções, como pode ser visto na Figura 2.2.d (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

No caso de partículas finas, estas irão descer pelas paredes do leito enquanto as bolhas de gás ascendem. Este regime é comumente denominado *slugging* como se observa na Figura 2.2.e. Aumentando ainda mais a velocidade do gás, em vez de bolhas observa-se o movimento turbulento das partículas com vazios de gás de várias formas e tamanhos. Para este padrão dá-se o nome de regime turbulento (Figura 2.2.g). Por fim, se acrescida mais velocidade ao fluxo as

partículas são carregadas para fora do leito caracterizando o regime de transporte, Figura 2.2.f (KUNII; LEVENSPIEL, 1991). É importante ressaltar que um leito fluidizado não irá passar, necessariamente, por todos os regimes em um mesmo equipamento, pois estes dependem de outros fatores além da velocidade do gás, como características da partícula, diâmetro do leito, quantidade de material particulado e tipo de distribuidor.

Figura 2.2: Regimes de fluidização



Fonte: Adaptado de (KUNII; LEVENSPIEL, 1991)

2.1.2 Velocidade de mínima fluidização e diagrama de pressão

Uma vez que o leito é fluidizado, a queda de pressão torna-se suficiente para suportar o peso das partículas. Desta forma pode-se dizer que:

$$(\text{força de arraste do gás}) = (\text{força peso aparente das partículas}) \quad (2.1)$$

A força de arraste pode ser descrita pela queda pressão e pela área transversal do leito. Por outro lado, a força peso das partículas é caracterizada pelo volume do leito, fração de sólidos e massa específica das partículas como apresentado na Equação 2.2.

$$\Delta p_b A_t = W = A_t L_{mf} (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) g \quad (2.2)$$

Rearranjando esta equação encontra-se a condição de mínima fluidização com a ressalva de sua validade apenas para fluidização homogênea.

$$-\frac{\Delta p_b}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) g \quad (2.3)$$

A queda de pressão por atrito em um leito fixo foi correlacionada por Ergun (Equação 2.4). Supondo que o ultimo ponto em que a velocidade do gás é medida no leito fixo será coincidente com o primeiro da fluidização pode-se combinar as Equações 2.3 e 2.4. Assim, encontra-se uma relação em função da velocidade de mínima fluidização a qual pode ser escrita de forma simplificada (Equação 2.5) usando os números adimensionais de Reynolds ($Re = (\rho_p U d_p) / \mu$) e Arquimedes ($Ar = \rho_g (\rho_s - \rho_g) d_p^3 g / \mu$). (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

$$-\frac{\Delta p_b}{L} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu U}{(\Phi_s d_p)^2} + 1,75 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{\rho_g U^2}{\Phi_s d_p} \quad (2.4)$$

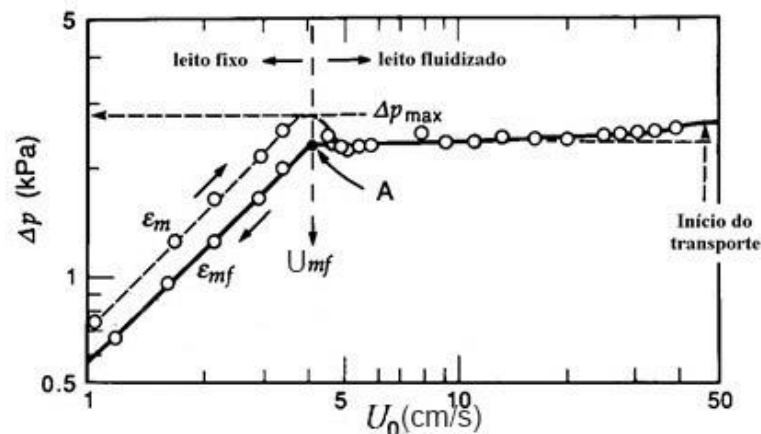
$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi_s} Re_{p,mf} + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi_s^2} Re_{p,mf} = Ar \quad (2.5)$$

Uma vez que a velocidade de mínima fluidização é um dos parâmetros mais importantes para o projeto de um leito, diversos autores realizaram experimentos e propuseram correlações para avaliá-la. Entretanto a porosidade do

leito varia com a temperatura de uma forma complexa quando seu diâmetro e massa específica estão na faixa de 40 – 500 μm e 1400 – 4000 kg/m^3 , respectivamente. Conseqüentemente a melhor forma de se obter este parâmetro é de forma experimental (HOWARD, 1989).

Na pratica faz-se a medição da queda de pressão em função da velocidade superficial do gás. Estes dados fornecem um diagrama bastante conhecido e útil para identificar a qualidade da fluidização, chamado de curva fluidodinâmica (Figura 2.3).

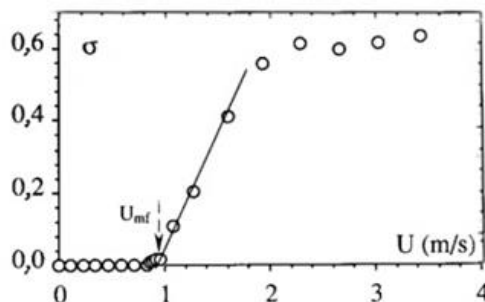
Figura 2.3: Exemplo de um diagrama de perda de pressão em função da velocidade do gás



Fonte: Adaptado de (KUNII; LEVENSPIEL, 1991)

Há outros métodos para se obter U_{mf} experimentalmente. GUPTA e SATHIYAMOORTHY (1999) descrevem outros dois. O primeiro ao medir a variação da porosidade do leito e o segundo através do coeficiente de transferência de calor, ambos variando em relação à velocidade do gás. Também se pode construir o diagrama do desvio padrão da variação de pressão normalizado em função da velocidade (Figura 2.4), nele a U_{mf} é definida pelo cruzamento da reta formada pela fração com crescimento linear do desvio padrão com o eixo das abscissas (TANNOUS; HEMATI; LAGUERIE, 1994).

Figura 2.4: Obtendo a U_{mf} a partir do desvio padrão da variação de pressão

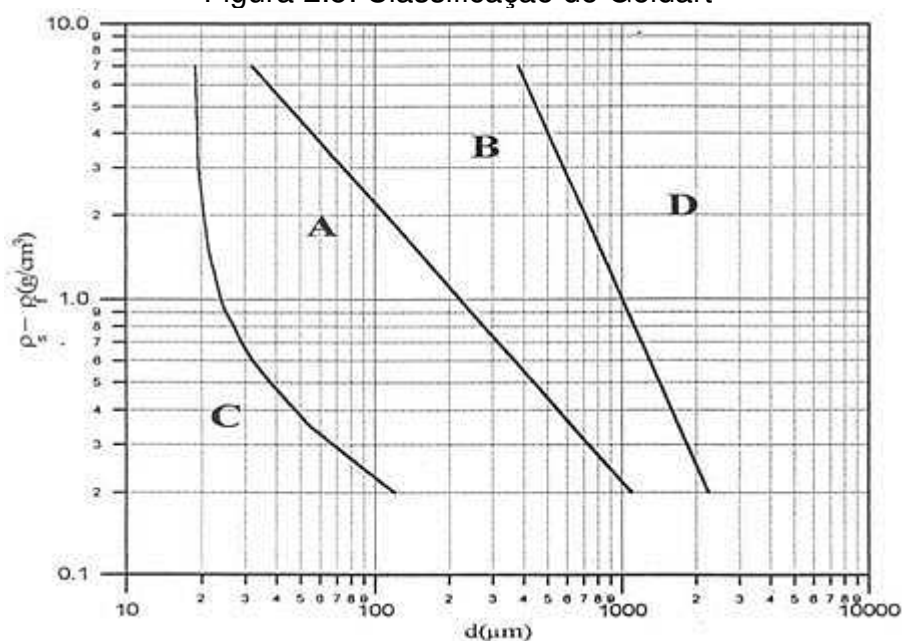


Fonte: Adaptado de (TANNOUS; HEMATI; LAGUERIE, 1994)

2.1.3 Caracterização e classificação de partículas

Partículas de tamanhos e densidades diferentes apresentam comportamento fluidodinâmico distinto. Para pesquisadores não é prático testar diversas partículas, principalmente em larga escala, quando deseja-se estudar apenas uma variável. Por esta razão GELDART (1973) propôs uma classificação que agrupa particulados com propriedades semelhantes quando fluidizadas por gás. Essa classificação leva em conta a diferença de massa específica entre a partícula e o gás fluidizante e o diâmetro médio do material particulado. Por exemplo, uma partícula com diâmetro médio igual a 100 μm e diferença de massa específica igual a 1 g/cm^3 será tipicamente classificada como pertencente ao grupo A (Figura 2.5).

Figura 2.5: Classificação de Geldart



Fonte: Adaptado de GELDART (1973)

Um exemplo típico de partículas do Grupo A são catalisadores de craqueamento. Leitos com este tipo de partícula tendem a expandir consideravelmente antes do surgimento das bolhas. Com o aumento da velocidade do gás estas se desestruturam e coalescem promovendo a mistura. Quando a velocidade superficial do gás é suficientemente alta para causar o *slugging*, este será simétrico.

Os materiais do Grupo B têm tamanho médio e densidade maiores se comparados ao Grupo A, sendo a areia o exemplo típico. Diferente do Grupo A o regime borbulhante pode ser observado logo após a velocidade de mínima fluidização. Além disso o leito se expande pouco e quando a corrente de gás é interrompida o leito colapsa rapidamente. A mistura no leito é quase inexistente na ausência das bolhas, as quais sobem mais rápidas do que o ar e aumentam de tamanho linearmente conforme a altura e velocidade em excesso. Em contraste com o grupo anterior o *slug* torna-se assimétrico em altas velocidades.

Partículas coesivas pertencem à categoria C. Este grupo é difícil de ser fluidizado, pois em leitos estreitos o material, por ser leve, é suspenso como um bloco. Por outro lado, em leitos mais largos os canais preferenciais aparecem com bastante facilidade. Estas dificuldades aparecem, principalmente, devido a forças interparticulares intensas, estas são resultado do tamanho muito reduzido do material, carga eletrostática, umidade ou caráter pegajoso. Para tornar a fluidização possível lança-se mão de agitadores mecânicos (GELDART, 1973). Cimento e farinha de trigo são exemplos de partículas do Grupo C (PRIETO, 2014).

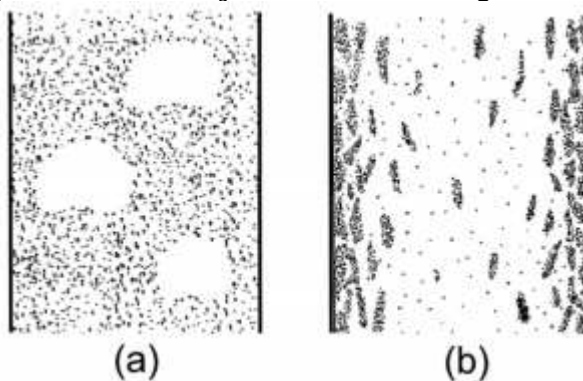
Por fim, o Grupo D é composto de partículas grandes e densas, por exemplo grãos de produtos agrícolas. Leitos com estes materiais formam bolhas grandes que ascendem com velocidade menor do que o gás possibilitando um mecanismo de troca gasosa. Entretanto a mistura de material na fase densa é pobre. Como as partículas são grandes o contato entre elas acaba sendo reduzido, o que possibilita a fluidização de alguns materiais que em tamanhos menores formariam aglomerados (GELDART, 1973). Para promover o melhor contato deste tipo de partícula usa-se um caso particular da fluidização, o leito de jorro. Estes leitos são usualmente constituídos por um corpo cilíndrico e uma base tronco-cônica. A partir de determinada velocidade superficial o fluido injetado provocará movimento ascendente de partículas e assim uma cavidade central. Esta aumenta de tamanho

conforme a velocidade do fluido gerando uma fonte de partículas que retornam pela região anular estabelecendo um ciclo de movimentação para as partículas (CREMASCO, 2012).

2.2 Técnicas de medida

Os parâmetros fluidodinâmicos como velocidade local de partícula, fluxo de sólidos, movimentação do gás e porosidade influenciam o desempenho das operações em leito fluidizado (YANG, 2003). Por exemplo, a troca de calor depende do contato entre partícula e fluido, logo o coeficiente local de transferência de calor tem forte relação com a concentração de sólidos e sua variação temporal. Em velocidades mais baixas a existência de bolhas pode fazer com que um gás reagente atravesse o leito acarretando em baixas conversões (Figura 2.6.a). Já em leitos circulantes, em que a velocidade do fluido é maior, pode haver segregação entre uma fase mais concentrada formada por aglomerações e outra mais diluída, porém contínua (Figura 2.6.b).

Figura 2.6: Formação de Bolhas e Aglomerados



Fonte: WERTHER (1999)

Isso mostra a importância em conhecer a distribuição detalhada do material particulado, tanto para o projeto de leitos fluidizados como para validar modelos computacionais (WERTHER, 1999).

As técnicas de medida podem ser agrupadas em intrusivas e não-intrusivas. Em geral, as técnicas não-intrusivas determinam as propriedades por meio de instrumentos alocados externamente, logo causam pouca interferência no escoamento que está sendo analisado. Já as intrusivas podem causar perturbações

e são baseadas em sondas de detecção de fase para medir propriedades locais (CASTILHO, 2007; OLIVEIRA, 2006).

A seguir serão apresentadas as principais técnicas intrusivas e não-intrusivas. Como dito anteriormente existem diversos parâmetros que podem ser medidos e conseqüentemente numerosos métodos para medir cada um. Uma vez que este trabalho faz análise de sinais de pressão o enfoque será dado para os medidores de pressão diferencial. Entretanto, também estarão presentes técnicas usadas para medir grandezas básicas como velocidade de partículas.

2.2.1 Medidores intrusivos

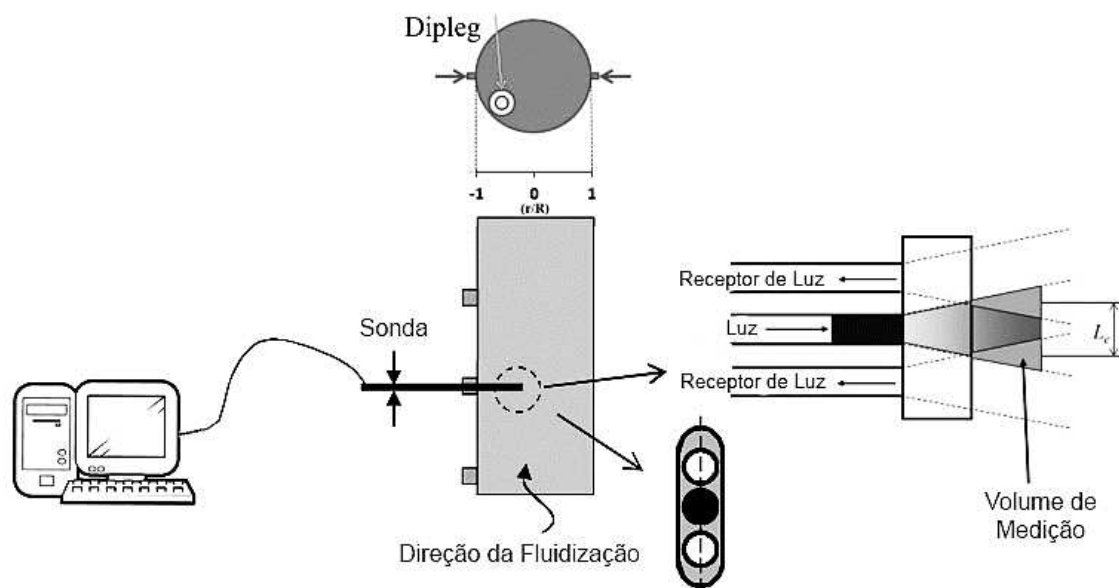
Sondas de fibra óptica

A sonda de fibra óptica é uma técnica intrusiva que tem sido usada para caracterizar a fluidodinâmica de leitos gás-sólido devido a sua simplicidade e baixo custo. Essas sondas podem ser usadas para medir tanto a velocidade das partículas como a concentração de sólidos.

Dentre suas vantagens estão a alta sensibilidade, velocidade de resposta, boa relação entre sinal e ruído, ser resistente a temperatura, impactos e corrosão, não sofre interferências eletrostáticas, são pequenas e leves, e podem se adequar a transmissão remota e detecção multicanal. Por outro lado a grande dificuldade em se utilizar este equipamento está em sua calibração já que a maioria dos procedimentos são empíricos (COSTA, 2016; XU *et al.*, 2013).

Um esquema típico está representado na Figura 2.7, neste a fibra central é responsável por iluminar as partículas que estão próximas ao cabeçote da sonda enquanto que as outras duas recebem a luz refletida (CASTILHO, 2007).

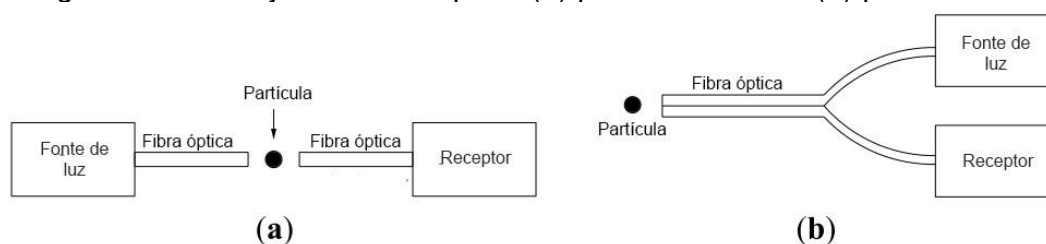
Figura 2.7: Esquema representativo de um sistema de sonda de fibra óptica



Fonte: Adaptado de (TEBIANIAN, 2015)

A aplicação da sonda de fibra óptica para obtenção da concentração de sólidos está relacionada com o espalhamento da luz provocado pelas partículas. A luz refletida é ampliada por um fotomultiplicador e convertida em um sinal em Volt (V). A sonda deve ser calibrada para relacionar essa tensão com a concentração de sólidos. Em geral há dois tipos de arranjo de sonda para esta finalidade, o denominado por transmissão e por reflexão (Figura 2.8.a - b respectivamente).

Figura 2.8: Arranjos de fibra óptica (a) por transmissão (b) por reflexão



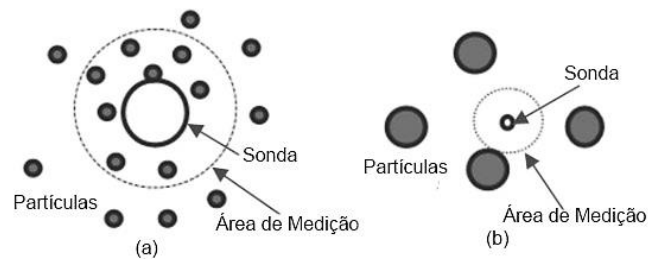
Fonte: Adaptado de (XU *et al.*, 2013)

No arranjo por transmissão o objeto encontra-se entre a fonte emissora e a receptora de luz. A aferição efetiva é dependente da distância entre as duas sondas, diâmetro e abertura do cabeçote. O sinal de saída é independente da cor da partícula e seu uso está restrito a baixas concentrações da fase sólida (CUTOLO *et al.*, (1990) realizou ensaios a fim de calibrar sondas com arranjo por transmissão e obteve bons resultados para concentrações volumétricas de sólido menores do que

0,16). Já no arranjo baseado na reflexão há apenas uma sonda e nela encontra-se tanto a fonte emissora como a receptora de luz e a eficiência da medida está relacionada com o diâmetro, abertura, ângulo de sobreposição e a sensibilidade do conversor fotoelétrico. Em oposição ao primeiro, este arranjo é sensível a cor e reflexibilidade das partículas, mas pode ser usado desde condições de leito fixo até fluxos diluídos (XU *et al.*, 2013).

O arranjo por reflexão pode ainda ser subdividido em dois tipos (Figura 2.9). O primeiro é aquele em que o diâmetro das partículas é menor do que a fibra. Neste tipo o sinal gerado por todas as partículas é integrado e o valor pode ser relacionado com a concentração na calibração. Desta forma é medida a concentração instantânea. O segundo tipo é aquele em que o diâmetro de partícula é maior do que a fibra óptica, logo o sinal corresponde a partículas únicas e é necessário conhecer a velocidade de partícula para converter os pulsos em concentração. Neste método é medida a concentração média (MATSUNO *et al.*, 1983).

Figura 2.9: Tipos de sonda do arranjo reflexivo



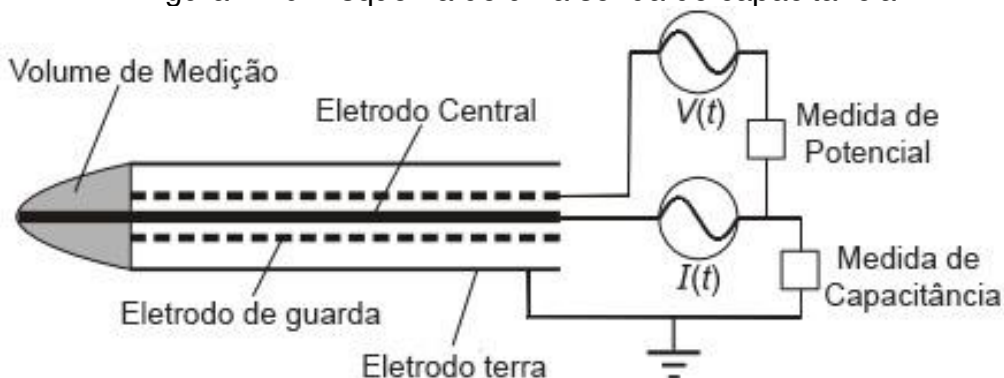
Fonte: Adaptado de (XU *et al.*, 2013)

Sondas de capacitância

As sondas de capacitância funcionam a partir da variação da permissividade dielétrica da mistura gás-sólido. A concentração de sólidos está fisicamente relacionada com a constante dielétrica da suspensão (K_e). Assim, a constante K_e é função das constantes dielétricas do fluido e do sólido (K_f e K_p respectivamente) e também da concentração de sólidos (c_v). Além disso, o diâmetro, forma e temperatura podem influenciar as medidas com ênfase para os dois últimos parâmetros (WIESENDORF; WERTHER, 2000).

O eletrodo de capacitância pode ser construído em tamanho bastante reduzido, logo há o benefício de causar pouca ou nenhuma perturbação no fluxo. O eletrodo de guarda (Figura 2.10) é responsável por eliminar as perturbações elétricas externas acarretando em um sinal mais acurado (VAN OMMEN; MUDDE, 2008).

Figura 2.10: Esquema de uma sonda de capacitância



Fonte: Adaptado de (VAN OMMEN; MUDDE, 2008)

O Quadro 2.1 traz um resumo das técnicas de medição intrusivas, seu tipo de medição, princípio de operação, vantagens e desvantagens.

Quadro 2.1: Resumo das técnicas de medida não intrusivas

Sonda de Fibra Óptica	Medição:	Velocidade e concentração de sólidos
	Princípio:	Emissão e detecção da luz refletida da superfície do material particulado
	Vantagens:	Baixo custo, alta sensibilidade, velocidade de resposta, resistência
	Desvantagens:	Calibração da sonda
Sonda de Capacitância	Medição:	Concentração de sólidos
	Princípio:	Relaciona a concentração de sólidos com a variação da constante dielétrica da mistura
	Vantagens:	Podem ser de tamanho bastante reduzido causando pouco perturbação no fluxo
	Desvantagens:	Constante dielétrica varia com a temperatura

Fonte: Adaptado de (CASTILHO; BRAGA; CREMASCO, 2006)

2.2.2 Medidores não-intrusivos

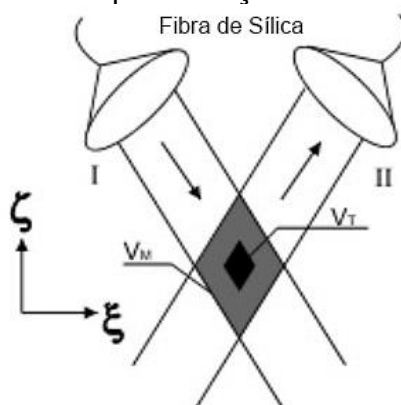
Visualização Direta

A observação direta do leito é uma das formas mais simples de se obter informação a respeito da distribuição de partículas no leito. Obviamente o problema está na natureza opaca do leito limitando seu uso em sistemas diluídos ou pseudo 2D. Além disso é necessário que as paredes sejam de material transparente como vidro ou acrílico. Também é importante tomar medidas para evitar o acúmulo de partículas nas paredes do leito devido eletrostática, por exemplo umidificar o gás fluidizante. (VAN OMMEN; MUDDE, 2008)

Laser Doppler Velocimetry (LDV)

A LDV é uma técnica de medição não intrusiva voltada a medição da velocidade de partículas. Seu funcionamento está na diferença entre a frequência do laser emitida por uma fonte (representada por I na Figura 2.11) e aquela espalhada pelas partículas. Essa diferença entre as frequências pode ser relacionada com a velocidade da partícula. Um revés da técnica é seu uso limitado a baixas concentrações, caso contrário existirão mais de uma partícula na região de foco. Além disso em sistemas concentrados a intensidade do laser decai rapidamente a medida que penetra na suspensão (CASTILHO, 2007).

Figura 2.11: Representação de um sensor LDV



Fonte: Adaptado de (WERTHER, 1999)

Laser Doppler Anemometry (LDA)

. Este equipamento usa partículas traçadoras para acompanhar as características cinemáticas do fluxo. Para não causar perturbação no mesmo a concentração e volume do traçador deve ser relativamente pequeno.

As vantagens em se usar esta técnica estão na alta definição acarretado pelo pequeno volume de medição, obtenção dos valores de velocidade instantâneas, ser desnecessário realizar a calibração devido a linearidade entre a frequência do sinal e o valor da velocidade, possibilidade de medir as três componentes do vetor velocidade, estabilidade e alta capacidade de reprodução das medidas. Por outro lado é necessário que exista baixa densidade ótica do meio (VARAKSIN, 2003).

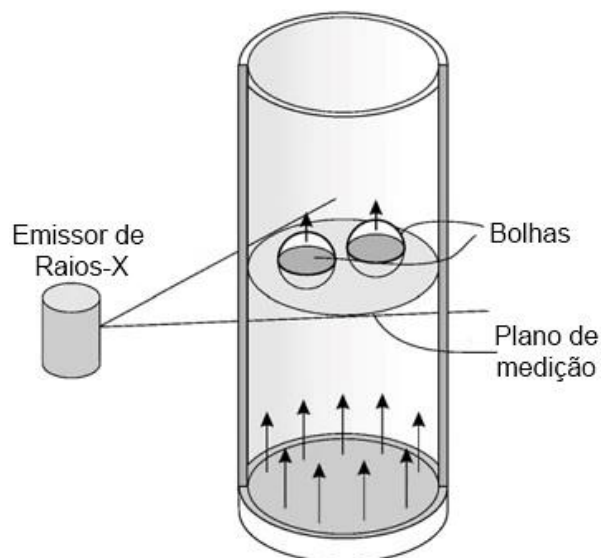
Apesar da LDA ser concebido para medição de velocidade instantânea VARAKSIN (2003) cita alguns exemplos de usos como caracterização do movimento de partículas, distribuição da velocidade média e pulsação de partículas grandes e distribuição da concentração de sólidos.

Tomografia computadorizada por raios X

A radiação pode ser usada para medir a fração de sólidos em um leito fluidizado. Esta técnica fornece imagens de seções transversais do leito através da densitometria nuclear. Nesta o par fonte de radiação e detectores são rotacionados e a absorção dos raios-X pode ser relacionada com a concentração de sólidos (Figura 2.12). Além disso fatores como a massa específica das partículas e características do emissor podem interferir nos resultados, logo a técnica necessita de um sistema de calibração que relacione a fração de sólidos com o raio do leito (CASTILHO; BRAGA; CREMASCO, 2006).

Apesar desta técnica ter uma baixa resolução temporal (em comparação com a tomografia de capacitância elétrica) e ter um ruído inerente ela não sofre interferência eletromagnética, isso faz com que a reconstrução da imagem, principalmente nas regiões centrais do leito sejam mais fáceis (MUDDE, 2010).

Figura 2.12: Esquema da tomografia de raios-X em leito fluidizado

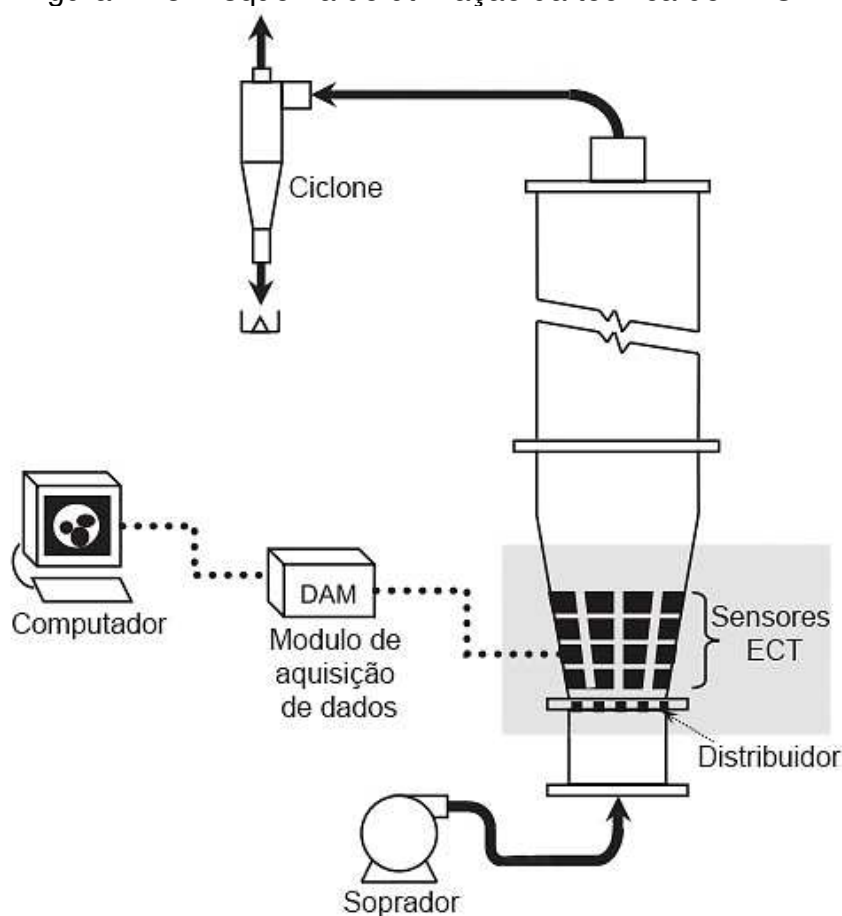


Fonte: Adaptado de (MUDDE, 2010)

Tomografia computadorizada por capacitância elétrica

A tomografia por capacitância elétrica (ETC) utiliza a diferença da constante dielétrica entre o gás e partícula para determinar a distribuição entre estas fases. Esta técnica se baseia no mesmo princípio das sondas por capacitância, entretanto por ser uma técnica não intrusiva os eletrodos estão localizados em torno da parede externa do leito (Figura 2.13). Estes são excitados por uma carga rápida enquanto a medição é feita em seu par correspondente, os valores obtidos formam uma imagem da distribuição da permissividade elétrica dos materiais (CASTILHO, 2007).

Figura 2.13: Esquema de utilização da técnica de ETC



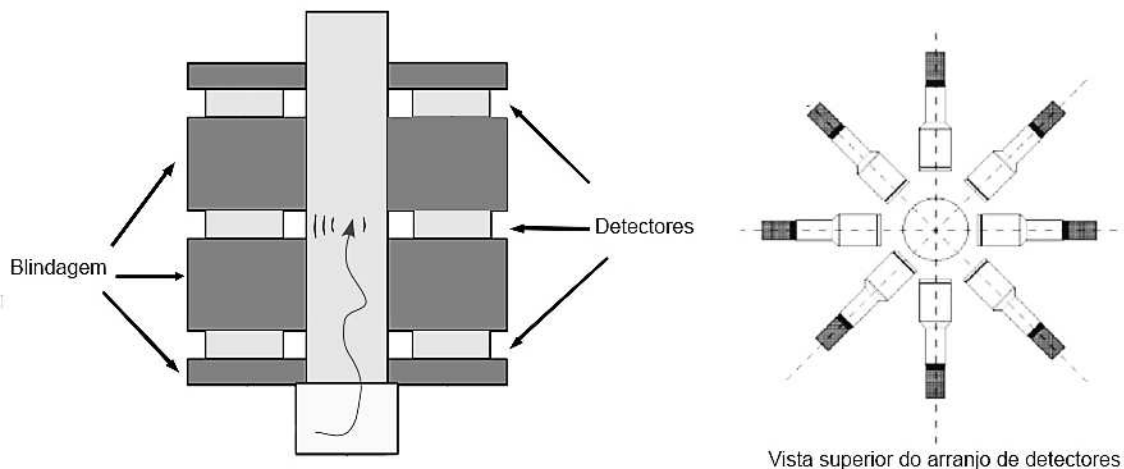
Fonte: Adaptado de (CHAPLIN; PUGSLEY, 2005)

As medições são reconstruídas na forma de imagens que representam a seção transversal do leito. Estas podem ser coletadas com frequências de até 200 Hz, o que permite capturar o comportamento dinâmico do leito. Além disso as imagens podem fornecer dados sobre a distribuição das fases e informações importantes sobre as bolhas como diâmetro e velocidade (CHAPLIN; PUGSLEY, 2005).

Rastreamento de partícula radioativa

O rastreamento de partícula radioativa (do inglês *Radioactive particle tracking* – RPT) é um método que se baseia em acompanhar o movimento de uma fonte radioativa, denominada traçador, a partir de detectores alocados externamente ao leito (Figura 2.14). O traçador deve ter propriedades similares ao material particulado que será fluidizado em termos de tamanho e densidade para que sua movimentação seja semelhante às demais (DUBRAWSKI *et al.*, 2013).

Figura 2.14: Arranjo de detectores para rastreamento de partícula radioativa em leito fluidizado



Fonte: Adaptado de (DUBRAWSKI *et al.*, 2013)

DUBRAWSKI *et al.* (2013) descreve um método para averiguar a distribuição de partículas. Este envolve dividir o número de registros em um determinado volume espacial (denominado célula) pelo número total de contagens registradas. Este valor é então dividido pelo volume percentual da célula e multiplicado pela massa específica aparente da partícula.

Rastreamento de partícula por temperatura

Neste tipo de rastreamento partículas são resfriadas com nitrogênio líquido e em seguida injetadas no leito. Os termissores são responsáveis por rastrear o caminho das partículas mais frias. Entretanto pela própria característica da operação unitária de possuir alta eficiência nas trocas térmicas o rastreamento possui tempo muito pequeno, uma vez que a temperatura das partículas resfriadas logo se iguala as demais. Desta forma são necessários múltiplos ensaios para aquisição de dados (SAVOLAINEN; KARVINEN, 2008).

Rastreamento de traçadores fosforescentes

O rastreamento de traçadores fosforescentes baseia-se na característica de certos materiais tornarem-se fluorescentes por determinado tempo e posteriormente decaírem a taxas constantes. A partícula traçadora é injetada no leito com um pulso rápido enquanto o detector consiste em um tubo fino conectado a um fotomultiplicador (CASTILHO, 2007).

Algumas vantagens dessa técnica são: 1) fácil injeção do traçador; 2) simples detecção on-line; 3) As partículas traçadoras podem ser idênticas ao material particulado evitando distúrbios no leito. Entretanto há possibilidade da partícula com traçador não ter comportamento ou propriedades físicas da partícula o que tornaria a avaliação do comportamento fluidodinâmico errônea (CASTILHO, 2007).

Medidores Acústicos

Os medidores acústicos nada mais são do que pequenos microfones que podem ser instalados na parede externa de um leito fluidizado, estes são particularmente interessantes em processos que operam em condições severas como em altas pressões (VAN OMMEN; MUDDE, 2008).

Os sinais acústicos já foram usados para monitorar processos farmacêuticos, granulação e transporte pneumático. Além disso, podem fornecer informações sobre o regime de fluidização se associado a análise estatística já que a fluidização possui um ruído particular que pode ser detectado pelos microfones. Os fenômenos em microescala como a colisão e fricção das partículas geram sinais acústicos que foram relacionados com a granulometria, rigidez e velocidade de partículas. Já os fenômenos em escala macroscópica como formação de bolhas podem ser estudados através de algoritmos de reconhecimento (LI *et al.*, 2011). Por outro lado os sinais se mostram mais complexos de serem analisados do que os sinais de pressão e em geral os medidores acústicos são utilizados apenas de modo qualitativo (VAN OMMEN; MUDDE, 2008).

Assim com anteriormente o Quadro 2.2 traz um resumo das técnicas de medição não-intrusivas, seu tipo de medição, princípio de operação, vantagens e desvantagens.

Quadro 2.2: Resumo das técnicas de medida intrusivas

Visualização Direta	Medição:	Informações qualitativas
	Princípio:	Observação direta de um leito com paredes transparentes
	Vantagens:	Simplicidade
	Desvantagens:	Uso laboratorial, sistemas diluídos ou pseudo 2D
Laser Doppler Velocimetry	Medição:	Velocidade de partículas
	Princípio:	Diferença entre as frequências de emissão e de espalhamento de luz
	Vantagens:	Alta acuidade
	Desvantagens:	Necessita de baixa densidade ótica (fração mássica de sólidos <0,015)
Laser Doppler Anemometry	Medição:	Velocidade e concentração de sólidos
	Princípio:	Rastreamento de traçadores com tamanho da ordem de microns
	Vantagens:	Alta definição, calibração desnecessária, estabilidade
	Desvantagens:	Sistemas diluídos
Tomografia por Raios-X	Medição:	Concentração de sólidos
	Princípio:	Imagem das seções transversais por atenuação da radiação
	Vantagens:	Concentração local mesmo próximo a parede do leito, não sofre interferência eletromagnética
	Desvantagens:	Baixa resolução temporal se comparada a tomografia por capacitância
Tomografia por capacitância elétrica	Medição:	Concentração de sólidos
	Princípio:	Diferença da constante dielétrica para determinar a distribuição das fases
	Vantagens:	Mais rápida e robusta
	Desvantagens:	Acumulo de carga eletrostática e re-calibração são problemas no uso industrial
Rastreamento de partícula radioativa	Medição:	Velocidade e concentração de sólidos
	Princípio:	Acompanhar o movimento de um traçador radioativo por detectores externos ao leito
	Vantagens:	Não-intrusiva
	Desvantagens:	Periculosidade, baixa acuidade, traçador deve ter propriedades semelhantes ao particulado

Continuação do Quadro 2.2: Resumo das técnicas de medida intrusivas

Rastreamento de partícula por temperatura	Medição:	Velocidade e concentração
	Princípio:	Rastrear partículas resfriadas com nitrogênio líquido
	Vantagens:	Não-intrusiva, baixa periculosidade se comparada a partícula radioativa
	Desvantagens:	Altas taxas de transferência de energia exigem múltiplos ensaios para aquisição de dados
Rastreamento de traçadores fosforescentes	Medição:	Velocidade e concentração de sólidos
	Princípio:	Rastrear partículas com características fluorescentes
	Vantagens:	Fácil injeção e detecção do traçador, decaimento luminoso evita acúmulo
	Desvantagens:	Traçador deve ter propriedades semelhantes ao particulado
Medidores acústicos	Medição:	granulometria, velocidade de partícula
	Princípio:	Sinais sonoros captados por microfones
	Vantagens:	Suportam condições severas como altas pressões
	Desvantagens:	Complexidade da análise

Fonte: Adaptado de (CASTILHO; BRAGA; CREMASCO, 2006)

2.2.3 Medidores de pressão diferencial

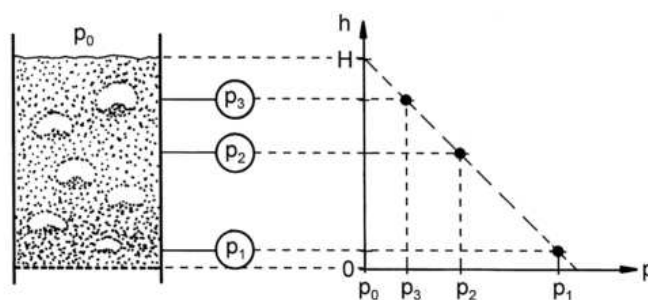
Os medidores de pressão não são novidades na avaliação de leitos fluidizados. Em 1964 SUTHERLAND já afirmava que uma das variáveis mais medidas para o estudo de propriedades de um leito gás-sólido é a queda de pressão no leito. Este parâmetro era usado como indicativo do início da fluidização e também como indicador da qualidade da mesma. O autor descreve, por exemplo, que um aumento da queda de pressão associado ao maior fluxo de gás sobre a região fluidizada é um indicativo de *slugging*, enquanto uma diminuição na queda de pressão relaciona-se com a formação de canais preferenciais.

De maneira geral, a medição da flutuação de pressão em leito fluidizado pode ser feita de duas formas. A primeira é colocando tomadas de pressão na parede do leito e a segunda inserindo sondas, tanto na vertical como na horizontal, dentro do leito (CLARK; MCKENZIE; GAUTAM, 1991).

As medidas de pressão são bastante difundidas em leitos industriais, por serem simples e baratas, e aliada a medida de temperatura são, de fato, as únicas

utilizadas de forma rotineira. O diferencial de pressão entre dois pontos (distantes “h” entre eles) pode fornecer informações bastantes úteis como, por exemplo, a estimativa da densidade do leito ($\rho_{leito} \approx \Delta p / (h \cdot g)$). Além disso, com uma série de medidores em diferentes alturas pode-se acompanhar a expansão do leito (Figura 2.15) em situação de borbulhamento, pois a concentração volumétrica de sólidos torna-se independente da altura (WERTHER, 1999).

Figura 2.15: Determinação da altura do leito expandido



Fonte: (WERTHER, 1999)

Quando a queda de pressão é medida por meio de um transdutor de pressão diversos pontos de pressão são registrados por unidade de tempo gerando assim uma série temporal. Este sinal pode conter mais informações sobre a dinâmica do leito em relação a medida diferencial global média. Diferente das medidas diferenciais usadas na indústria, onde mede-se a queda de pressão entre dois ou mais pontos, o sinal de pressão como série temporal é geralmente aplicado de forma simples, como pressão estática. Entretanto existem outros métodos como a pressão diferencial entre um ponto no leito e outro na região de *freeboard*, no qual a pressão pouco varia. Também pode-se utilizar dois pontos no leito, mas neste caso será avaliada a hidrodinâmica entre eles (VAN OMMEN; MUDDE, 2008).

As séries temporais de pressão começaram a ser utilizadas para identificação de diferentes regimes de fluidização no início dos anos 80. Na condição de leito fixo, na qual a velocidade do gás é baixa, as flutuações de pressão têm amplitudes baixas uma vez que não há presença de bolhas no leito, existem apenas pequenas colisões e vibrações de partículas com o fluido que percola o leito. Após o início da fluidização as flutuações de pressão aumentam conforme a velocidade do gás, assim como o tamanho das bolhas. Em especial o regime de *slugging* produz

consideráveis flutuações de pressão pois as bolhas grandes induzem a maior oscilação na superfície do leito (BI, 2007).

As flutuações de pressão em um leito gás-sólido podem originar-se, basicamente, por três fontes. A primeira é a passagem direta das bolhas pela sonda. A segunda fonte é devida à variação do nível do leito ou pelas ondas na superfície do leito causadas pelas explosões das bolhas. Por fim, a terceira forma é referente à vibração mecânica das partículas. Assim a medição local do sinal de pressão consiste de oscilações causadas por fenômenos pontuais e por ondas de pressão geradas em outras localidades. Desta forma a análise destes sinais tornam-se complexas uma vez que se trata de um fenômeno de múltiplas escalas. Para isso há ferramentas que vão desde simples métodos estatísticas até avançadas análises de caos (BI, 2007).

VAN OMMEN e MUDDE (2008) citam boas práticas na obtenção do sinal como: 1) correto dimensionamento dos transdutores de pressão, 2) uso de telas para evitar a entrada de partículas finas na sonda, 3) correto posicionamento das sondas, 4) uso de filtros para minimizar o ruído, 4) trabalhar com um sinal de média zero e 5) garantir que a série seja suficientemente longa. Com estes cuidados os sinais de pressão podem trazer resultados bastante significativos na caracterização do regime, detecção de aglomerações e podem ser usados para o controle e automação de leitos fluidizados.

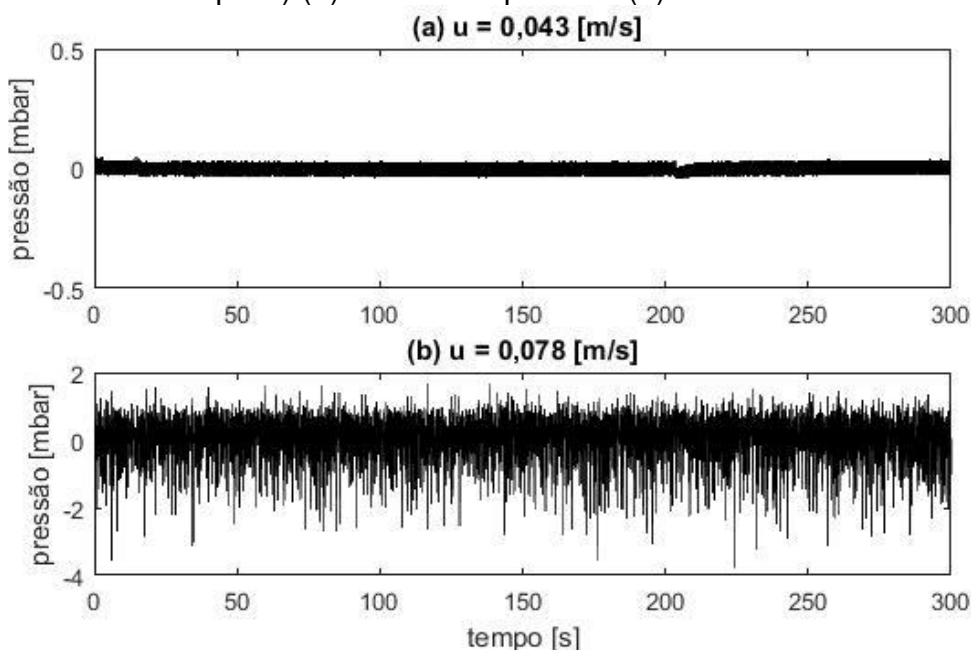
2.3 Métodos aplicados em análise de sinais

Como descrito anteriormente o sinal de pressão não é simples de ser analisado devido à variedade de fatores que o influenciam. Entretanto as sondas de pressão são a técnica de medida mais usada para determinar o regime gás-sólido, logo desenvolveu-se diversas ferramentas para investigar e vincular as características da série temporal com os fenômenos físicos da fluidização. Sendo assim, é apresentado uma breve revisão das técnicas usadas. Estas estão, em geral, agrupadas em três categorias: no domínio do tempo, da frequência e no espaço de fases (VAN OMMEN *et al.*, 2011).

2.3.1 Análise no domínio do tempo

As análises de séries temporais se iniciam com dados $(x(n))$ com $n = 1, 2, 3, \dots, N$ medidos em intervalos de tempo equidistantes (Δt) , ou seja, uma frequência de amostragem $f_s = 1/\Delta t$, como é exemplificado na Figura 2.16.

Figura 2.16: Exemplo de séries temporais. Adquiridos para a partícula 1 (esferas de vidro do tipo B) (a) em leito expandido (b) em leito fluidizado



Fonte: Elaborada pelo autor

O método mais simples de análise no domínio do tempo é a visualização da sequência dos dados em função do tempo. A simples observação é importante antes de qualquer tipo de processamento, pois pode identificar algum problema na aquisição de dados e também é um indicador qualitativo da complexidade do escoamento (VAN OMMEN *et al.*, 2011).

Outra forma de interpretar o sinal é através do desvio padrão, uma mudança em sua amplitude pode ser usada para identificar o ponto de mínima fluidização, detectar defluidização ou ainda a passagem do regime borbulhante para o turbulento. A maior desvantagem em caracterizar a fluidização desta forma é que se perde informação do domínio do tempo (VAN OMMEN *et al.*, 2011).

O desvio padrão (σ) é dado pela Equação 2.6, na qual a média (\bar{x}) está descrita na Equação 2.7.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.6)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.7)$$

O desvio padrão pode ser utilizado para obter a velocidade de mínima fluidização. Como demonstrado por FELIPE e ROCHA (2007), a metodologia consiste em construir um gráfico do desvio padrão em função da velocidade do gás e traçar uma reta em que a U_{mf} estará na intersecção desta com o eixo da velocidade, uma vez que as velocidades acima da mínima fluidização demonstram um crescimento linear com o desvio padrão. Esta técnica mostrou-se apropriada para diversos tipos de partícula e bastante interessante para a indústria uma vez que não há necessidade de defluidizar o leito para sua execução, uma vez que a reta pode ser traçada com as velocidades acima da mínima fluidização.

Além do desvio padrão pode-se citar a variância, o coeficiente de assimetria (*skewness*, Equação 2.8) e o coeficiente de achatamento (*flatness*, Equação 2.9). Enquanto a variância define o desvio da distribuição em relação a uma distribuição normal os outros coeficientes trazem informação quanto à intermitência nas séries temporais (JOHNSSON *et al.*, 2000).

$$S = \frac{1}{N\sigma^3} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3 \quad (2.8)$$

$$F = \frac{1}{N\sigma^4} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4 \quad (2.9)$$

Por fim, há funções denominadas de autocorrelações (Equação 2.10) e correlação cruzada (Equação 2.11). A primeira expressa a relação entre dois pontos separados por um intervalo de tempo. Esta não é usada com frequência para análise em leitos gás-sólido, pois existem formas equivalentes e mais simples de serem interpretadas, como a PSD (*Power Spectral Density*). A segunda relaciona sinais

obtidos por sensores posicionados em locais diferentes no leito (SASIC; LECKNER; JOHNSON, 2007).

$$c_{xx}(k) = \sum_{n=0}^{N-k-1} (x(n) - \bar{x})(x(n-k) - \bar{x}) \quad (2.10)$$

$$c_{xy}(k) = \sum_{n=0}^{N-k-1} (x(n) - \bar{x})(y(n-k) - \bar{y}) \quad (2.11)$$

2.3.2 Análise no domínio da frequência

A transformada de Fourier é uma ferramenta bastante usada na análise de sinais. Esta técnica consiste na decomposição do sinal em termos de senoides (ou exponenciais complexas) e com isso o sinal passa a ser representado no domínio da frequência (PROAKIS; MANOLAKIS, 1996).

Esta ferramenta tem sido utilizada para sinais de pressão em leitos fluidizados e seu principal objetivo é determinar as frequências e amplitudes dominantes nas séries temporais. Além disso, é empregada no *scale-up* de leitos pela comparação dos espectros do modelo laboratorial com a escala industrial (ANDRES e ORDOÑEZ, 2014)

Para determinar as frequências dominantes uma amostragem de 20 Hz é considerada suficiente, uma vez que os fenômenos provenientes da fluidização contêm frequências tipicamente abaixo de 10 Hz. O espectro é então obtido através da transformada de Fourier que proporciona uma relação unidimensional entre os domínios do tempo e da frequência (Figura 2.17). Desta forma, quando se analisa o sinal em um dos domínios as informações do outro é perdida. Conseqüentemente a informação obtida com a transformada é restrita para sinais estacionários já que a localização temporal da informação é perdida (SASIC *et al.*, 2007).

Há diversos procedimentos para calcular os espectros e os mesmos podem ser divididos em dois grupos: paramétrico e não paramétrico. O primeiro é utilizado quando a quantidade de pontos é insuficiente. O segundo pode ser exemplificado pelo método de Welch, e talvez seja o mais comum. Nele a série

temporal é dividida em Z segmentos de tamanho N_s de acordo com a Equação 2.12. O espectro para cada segmento é então estimado pela Equação 2.13. Em seguida o parâmetro “ V ” é normalizado por um fator de potência na função janela, $w(n)$ (Equação 2.14) e por fim calcula-se o espectro de potência médio (Equação 2.15) (JOHNSSON *et al.*, 2000).

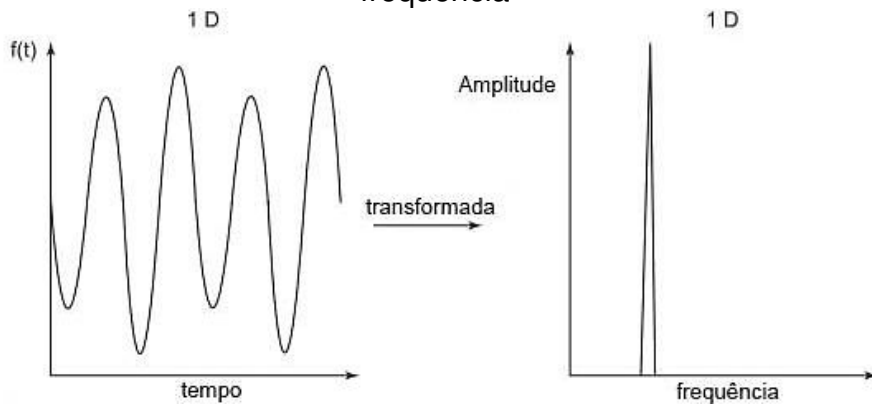
$$x_i(n) = x(n + iN_s) \quad n = 1, 2, \dots, N_s \quad i = 1, 2, \dots, Z \quad (2.12)$$

$$P_{xx}^i(f) = \frac{1}{N_s V} \left| \sum_{n=1}^{N_s} x_i(n) w(n) \exp(-j2\pi f n) \right|^2 \quad (2.13)$$

$$V = \frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} w^2(n) \quad (2.14)$$

$$P_{xx}(f) = \frac{1}{Z} \sum_{i=1}^Z P_{xx}^i(f) \quad (2.15)$$

Figura 2.17: Representação do sinal $f(t)$ no domínio do tempo e no domínio da frequência

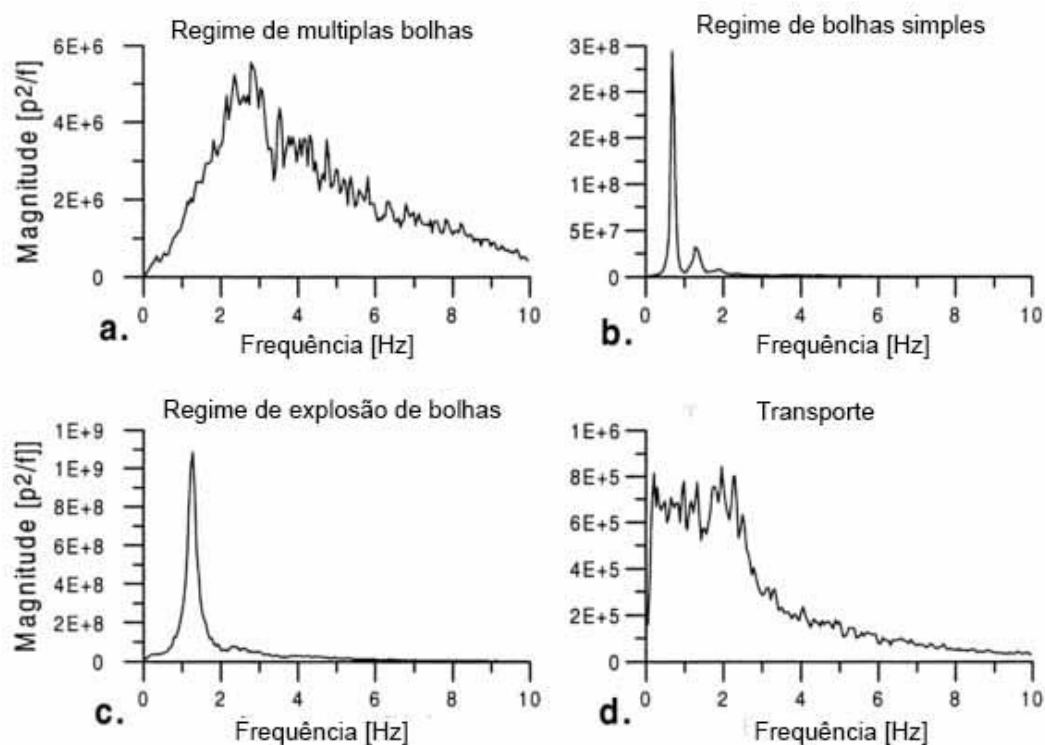


Fonte: Adaptado de (SASIC *et al.*, 2007)

A análise espectral pode identificar diferentes regimes fluidodinâmicos, por exemplo, pode-se citar o trabalho de JOHNSSON *et al.* (2000), o qual analisou quatro regimes de escoamento. O regime de múltiplas bolhas tem por característica uma base mais larga e seu máximo localizado em aproximadamente 3 Hz (Figura 2.18.a). No segundo caso, o regime de bolha simples, a frequência dominante está entre 0 e 1 Hz e o pico é relacionada à passagem da bolha unitária, em contraste com o regime anterior (Figura 2.18.b). Já no regime de explosão de bolhas o pico está em aproximadamente 1,3 Hz e o espectro possui base mais larga com um resquício de energia nas frequências maiores que 2 Hz (Figura 2.18.c). Na condição

de transporte nota-se ausência de uma frequência dominante, embora boa parte da energia encontra-se nas menores frequências (Figura 2.18.d).

Figura 2.18: Exemplos de espectros de potência para os regimes (a) de múltiplas bolhas (b) simples (c) explosão de bolhas (d) transporte



Fonte: Adaptado de (JOHNSSON *et al.*, 2000)

FELIPE e ROCHA (2004) estudaram regimes de fluidização utilizando três tipos de partículas da classificação de Geldart (C, A e B) em colunas cilíndricas convencionais. Estas partículas permitiram a observação de regimes distintos como leito fixo, borbulhante simples, múltiplo e explosivo, *slugging* de parede e flutuante e canais preferenciais com o particulado do tipo C. A variedade de condições possibilitou constatar espectros de potência particulares para cada regime, como discutido anteriormente. Além disso os autores observaram que a análise espectral permitiu acompanhar a estabilidade dos estados de fluidização. Já PARISE (2007) utilizou a análise espectral em conjunto com a distribuição exponencial gaussiana para identificar as regiões de defluidização do leito. Os ensaios indicaram que em leito fluidizado os espectros de pressão possuem valores mais altos de amplitude e conteúdo de frequência que no caso de leito fixo.

Além dos ensaios experimentais, outros autores (SCATENA *et al.*, 2017) aplicaram a análise espectral em um sistema fluidodinâmico simulado por CFD cujos resultados concordaram com dados obtidos em laboratórios. Os espectros referentes a simulação foram contínuos e não possuíam grande amplitude para frequências maiores que 10 Hz característica intrínseca da fluidização. Por outro lado, os autores revelaram diferenças entre as frequências dominantes quando comparados os espectros provenientes dos ensaios experimentais e a simulação.

2.3.3 Análise no espaço de fases

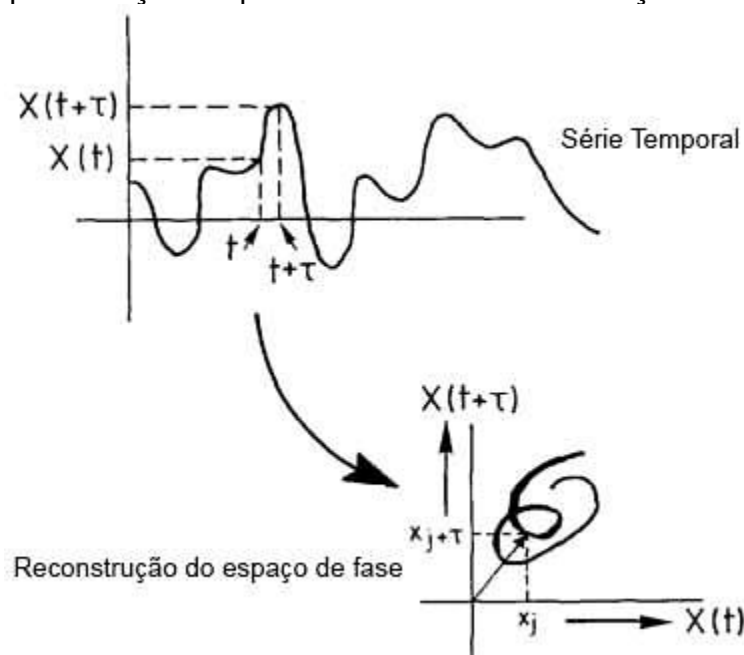
Apesar de muito utilizada, a análise espectral ainda é deficiente, pois em muitos processos é difícil de verificar uma frequência dominante exigindo simplificações o que, muitas vezes, torna a análise subjetiva (PRIETO; CREMASCO, 2015). Em 1989, Stringer J., deu início aos trabalhos utilizando análise do caos. Esta usa reconstrução de atratores em um espaço de fases e estuda do grau de previsibilidade de um sistema a perturbações.

A reconstrução dos atratores (Figura 2.19) é feita através das coordenadas de tempo de atraso ou passo de reconstrução (τ) e a dimensão de imersão (m) (Equação 2.16). Assim é possível converter uma série temporal com N elementos em um conjunto de $N-m$ vetores, os quais conterão m elementos (CASTILHO, 2011).

$$X_t = [x(t_i), x(t_i + \tau), \dots, x(t_i + (m - 1)\tau)] \quad (2.16)$$

Desta forma o atrator estranho de um sistema caótico é uma figura com m dimensões, as quais representam o número de graus de liberdade do sistema no espaço de fases. Apesar das inúmeras dimensões possíveis, os atratores muitas vezes, se restringem a apenas parte deste espaço. Isso reflete a natureza de fractal do atrator, caracterizada por um número adimensional denominado dimensão de correlação (D), a qual associa-se à complexidade espacial do atrator (VAN DEN BLEEK; SCHOUTEN, 1993).

Figura 2.19: Representação esquemática de uma reconstrução em duas dimensões

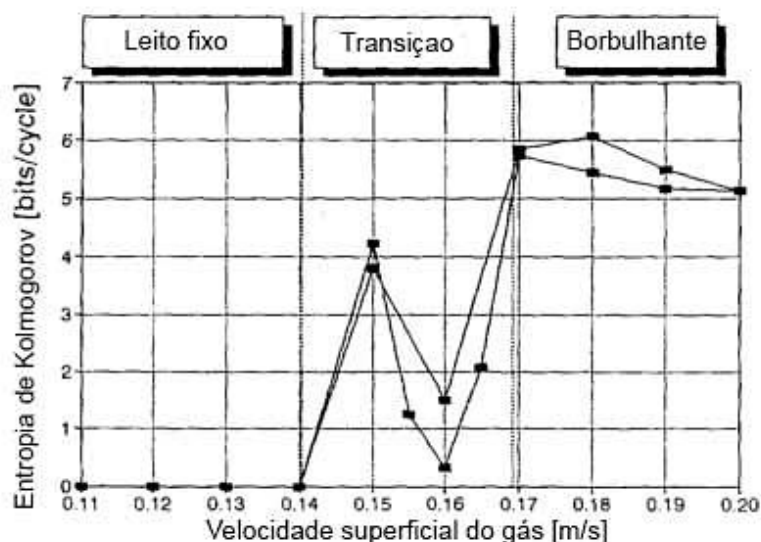


Fonte: Adaptado de (VAN DEN BLEEK; SCHOUTEN, 1993)

O atrator caracteriza a dinâmica do sistema de forma única e pode ser relacionado a uma série de invariantes que facilitam a interpretação como dimensão de correlação (D), expoentes de Lyapunov e a entropia de Kolmogorov (K). Os expoentes positivos de Lyapunov caracterizam a taxa de divergência entre dois pontos vizinhos, ou seja, é uma medida do comportamento caótico do sistema. Já os valores da entropia de Kolmogorov relacionam-se com a quantidade de informação no sistema e mede a previsibilidade a perturbações do escoamento. Valores maiores de entropia significam mais desorganização ou imprevisibilidade (CASTILHO, 2011; VAN DEN BLEEK; SCHOUTEN, 1993)

A entropia de Kolmogorov pode ser utilizada para identificar a os regimes fluidodinâmicos. Como exemplo, VAN DEN BLEEK e SCHOUTEN (1993) utilizaram esta ferramenta em um leito gás-sólido contendo partículas de poliestireno. Os resultados apresentados na Figura 2.20 mostram que análise é capaz de identificar facilmente o início da fluidização com o aumento da entropia. Além disso, diferentemente das análises clássicas, o caos mostra-se mais sensível ao identificar uma região de transição. Nesta é possível observar uma reorganização antes da mudança para um comportamento caótico, indicativo do borbulhamento do leito.

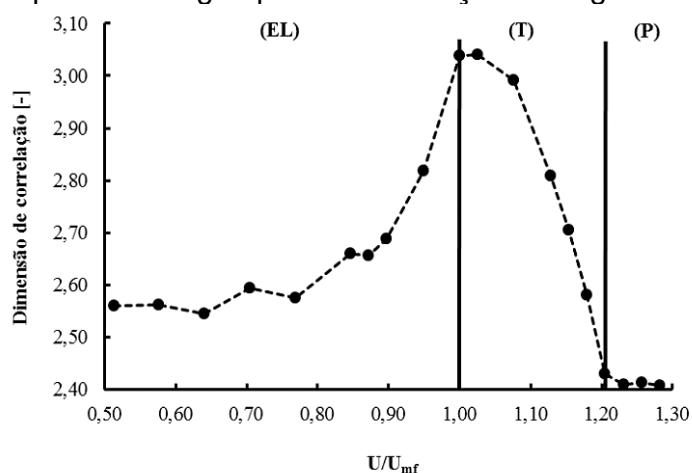
Figura 2.20: Entropia de Kolmogorov em função da velocidade superficial do gás para identificação de regimes em leito fluidizado



Fonte: Adaptado de (VAN DEN BLEEK; SCHOUTEN, 1993)

A dimensão de correlação é usada para o mesmo fim. O trabalho de PRIETO e CREMASCO (2015) conseguiu identificar o ponto de mínima fluidização no momento em que a dimensão de correlação é máximo. Em seguida uma região de transição e o regime pistonado quando a complexidade do sistema é baixa. Este resultado relacionado à fluidização de partículas de FCC do tipo A, pode ser observado na Figura 2.21.

Figura 2.21: Exemplo da variação da Dimensão de correlação em função da velocidade superficial do gás para identificação de regime fluidodinâmico



Fonte: (PRIETO; CREMASCO, 2015)

A vantagem deste tipo de análise segundo CASTILHO (2011) em comparação com as técnicas mais comuns no domínio do tempo e das frequências

é que esta leva em consideração o comportamento não linear como as encontradas em leito fluidizado circulante (LFC). A partir de seu estudo o autor relacionou a entropia de Kolmogorov, a dimensão de correlação com os fenômenos de formação e repartição de *clusters*, turbulências, interações entre partículas, por exemplo. Além disso a análise possibilitou a identificação de regimes fluidodinâmicos.

2.4 Transformada *wavelet*

Como visto anteriormente a análise de sinais dispõe de diversas ferramentas. Dentre elas, uma das mais conhecidas é a transformada de Fourier, a qual transfere as informações das séries do domínio do tempo para o da frequência. Essa transformação possui o inconveniente da perda das informações temporais, pois quando se observa um espectro construído com esta ferramenta não se sabe quando um evento em particular ocorreu.

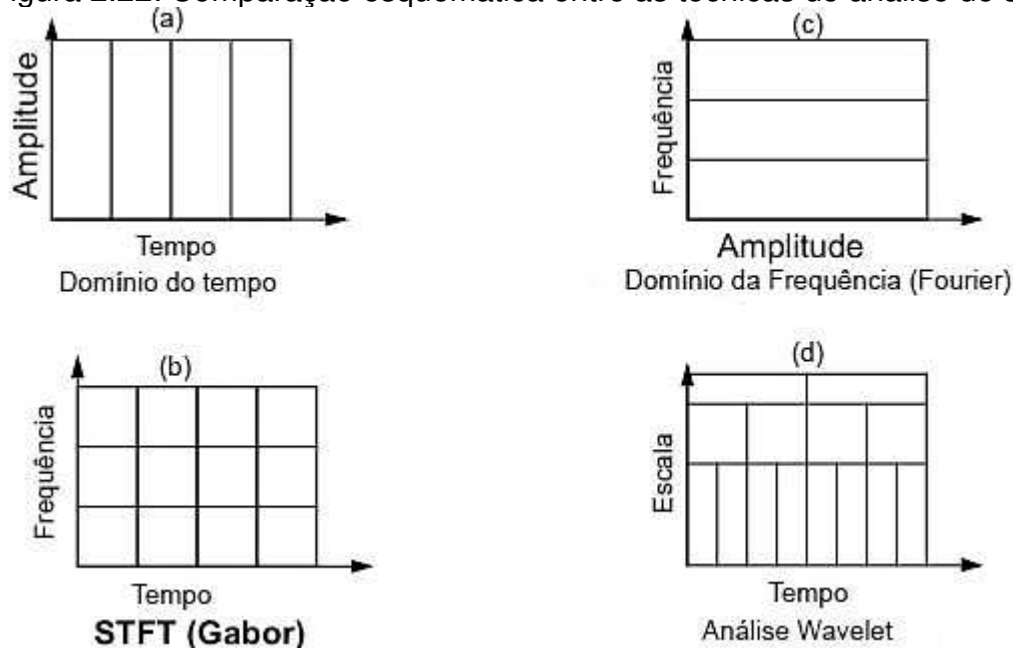
Nos casos em que o sinal é estacionário a perda de informação no domínio do tempo, em geral, é pouco relevante, mas em eventos transitórios o cenário muda, já que em muitos casos, busca-se saber quando determinado fenômeno ocorreu. Para contornar este problema, criaram-se análises tempo-frequência. Uma alternativa encontrada por Dennis Gabor (1946) foi dividir o sinal em intervalos curtos de tempo e calcular suas frequências separadamente, sendo esta metodologia conhecida como *Short Time Fourier Transform* (STFT). O inconveniente desta técnica é que sua precisão fica limitada ao intervalo de tempo escolhido e, uma vez determinado o tamanho da janela de tempo, esta será a mesma para todas as frequências (MISITI, 1996).

Outra abordagem, que ao invés de recortar janelas no tempo, se faz recortes nas frequências do sinal, e desta forma se filtra diferentes bandas de frequência e analisa-se o conteúdo de energia das bandas. Esta técnica é a que se denomina análise de *wavelet*. A energia que é alvo da análise trata-se de uma definição em processamento de sinais que visa medir sua força e pode ser aplicada a qualquer tipo de sinal (ou vetor) independentemente deste possuir, de fato, energia (propriedade quantitativa descrita pela física)(MATHURANATHAN, 2013).. Este mecanismo é capaz de decompor um sinal em faixas de frequência, nos quais a

resolução está relacionada com a frequência central da faixa por um fator de escala de forma inversamente proporcional (PENHA, 1999).

Como se pode ver na Figura 2.22, a *wavelet* é a evolução lógica da STFT, sendo um método que utiliza o recurso de janelas, porém com variação de tamanho para diferentes regiões. Desta forma ela permite utilizar intervalos de tempo longos em regiões de baixas frequências e curtos onde há alta frequência de informação.

Figura 2.22: Comparação esquemática entre as técnicas de análise de sinal



Fonte: Adaptado de (MISITI, 1996)

2.4.1 Aplicações da transformada de *wavelet*

De forma geral a análise *wavelet* é capaz de revelar aspectos do sinal imperceptíveis para outras técnicas. Por exemplo, ela pode ser usada para identificar tendências, pontos de descontinuidade e auto-similaridade. Além disso, pode ser usada para compressão e retirada de ruído sem causar grandes perdas no sinal (MISITI, 1996).

Os geofísicos foram os pioneiros na aplicação das *wavelets* em dados sísmicos, decorrentes de pesquisas para exploração de óleo e minerais, já que os matemáticos que as desenvolveram só as aplicaram para solução de sistemas abstratos e não visualizaram na área de processamento de sinais (BOGGESS; NARCOWICH, 2001).

A transformada de *wavelet* (WT – *Wavelet Transform, do inglês*) mostrou-se uma poderosa ferramenta para análise de sinais não estacionários de origens diversas como som, radar, sonar, sísmicos, sistemas biomédicos (eletrocardiogramas (ECG)), processamento e compressão de imagens e reconhecimento de padrões (DEBNATH, 1998).

TRUCHETET e LALIGANT (2004) publicaram uma revisão sobre as aplicações da *wavelet* na indústria. Dentre elas pode-se citar:

- Processamento de sinais acústicos para detecção de defeitos e automatização de mecanismos de controle de qualidade. Analisando o som de motores automotivos ou ainda em misturadores de cimento (som emitido pela betoneira).
- Sistema de geração de energia para monitorar perturbações de voltagem.
- Testes não destrutivos ao analisar os sinais produzidos pelo vazamento de fluxo magnético em cabos de aço.
- Processamento de sinais eletroquímicos.
- Modelagem de sinais estocásticos como velocidade do vento e séries temporais de mercados financeiros.
- Algoritmos de compressão de imagem. O formato conhecido internacionalmente como JPEG 2000 utiliza a transformada *wavelet* em sua forma discreta.
- A transformada *wavelet* em três dimensões está sendo usada para retirar o ruído e processar imagens de monitoramento via satélite.
- Processamento de imagens na análise de escoamentos turbulentos.

Além disso, essa ferramenta tem sido bastante utilizada em diagnóstico de doenças cardíacas e cerebrais. A análise de eletrocardiogramas (ECG) pode fornecer informações valiosas sobre a condição do coração de um paciente e a WT é uma ferramenta efetiva para discriminar anomalias nos sinais de ECG e também possibilita algoritmos para diagnósticos automatizados (SAHOO *et al.*, 2017). FAUST *et al.* (2015) fez uma revisão sobre o uso da *wavelet* em sinais de eletroencefalogramas (EEG). Estes possuem variações muito discretas, baixas resoluções e altas taxas de ruído. A WT, nesta área, é uma ferramenta estabelecida para remoção de ruído e prover informações em diversas janelas de frequência.

Como visto a transformada *wavelet* possui diversas aplicações em inúmeras áreas. Além do mais há variações de formas como a contínua e discreta possibilidade de analisar sinais em uma, duas ou mais dimensões e, por fim, a capacidade de concentrar informações de frequência e tempo são as razões para sua implementação em múltiplos fins.

2.4.2 Representação dos sinais

As técnicas para análise de sinais estão associadas ao conceito de transformação de um domínio para outro. Por exemplo, a representação do sinal que está no domínio do tempo para então apresentar-se no domínio da frequência. Ainda pode-se cogitar em uma evolução, em que se transforma um sinal do tempo para tempo-frequência. Essas estratégias são sempre com a intenção de se obter o máximo de informação a respeito do sinal (PENHA, 1999).

Matematicamente os sinais podem ser representados de forma genérica por expansões. Para isso um sinal $x(t)$ pertencente ao domínio Ψ (que pode ser finito ou não) pode ser representado pela combinação linear de funções elementares $\Psi_n(t)$ como apresentado na Equação 2.17.

$$x(t) = \sum_n a_n \Psi_n(t), \quad n \in \mathbb{Z} \quad (2.17)$$

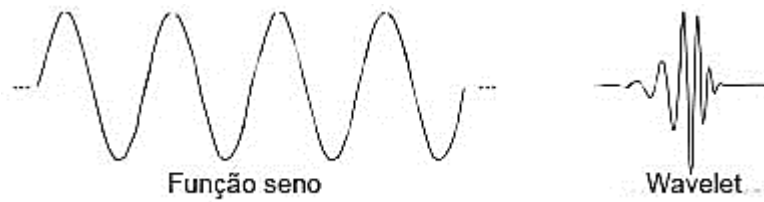
Assim se todo sinal puder ser representado pela expansão pode-se definir o produto interno:

$$a_n \equiv \langle \sigma, \hat{\Psi}_n \rangle = \int s(t) \hat{\Psi}_n(t) dt \quad (2.18)$$

Este produto interno é denominado transformação. Os coeficientes a_n são, fisicamente, uma medida entre o grau de similaridade entre o sinal e a função $\Psi_n(t)$.

Na transformada de Fourier as funções elementares são senos e cossenos, ou seja, funções infinitas no domínio do tempo. Já nas *wavelet* são ondas finitas e centradas em um tempo particular (Figura 2.23). Deste modo pode-se localizar a informação tanto no tempo como na frequência (PENHA, 1999).

Figura 2.23: Representação das funções elementares



Fonte: Adaptado de (MISITI, 1996)

2.4.3 Transformada *wavelet* contínua (CWT)

Baseando-se na ideia de que as *wavelets* são uma família de funções de conteúdo finito a sua variação é obtida através de translação e dilatação da função original $\Psi(t)$ que sofrerá essa variação é denominado *wavelet* mãe (DEBNATH, 1998).

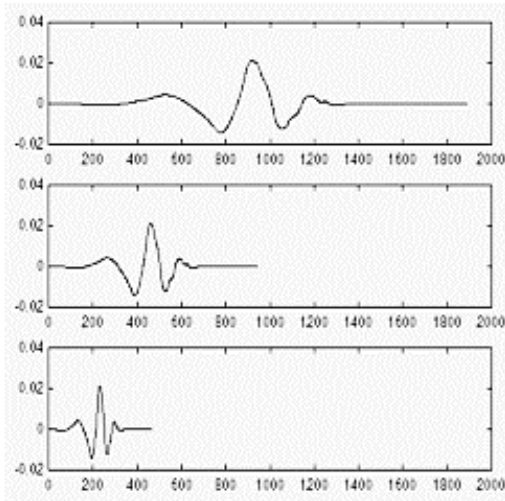
$$\Psi_{a,b}(t) = \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.19)$$

Desta forma define-se a transformada contínua:

$$CWT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2.20)$$

Nesta equação o parâmetro a representa a escala e está relacionado ao recíproco da frequência. Já b define a translação no tempo.

De forma gráfica o escalonamento da *wavelet* está apresentado na Figura 2.24. Como pode-se observar quanto menor o parâmetro a mais comprimida está a *wavelet*. Em relação a translação no tempo, a CWT se move de forma contínua no eixo do tempo, esta característica é a que dá nome a transformada (Figura 2.25). Além disso, provoca a superposição parcial das *wavelets* resultando em certa redundância na CWT (PENHA, 1999).

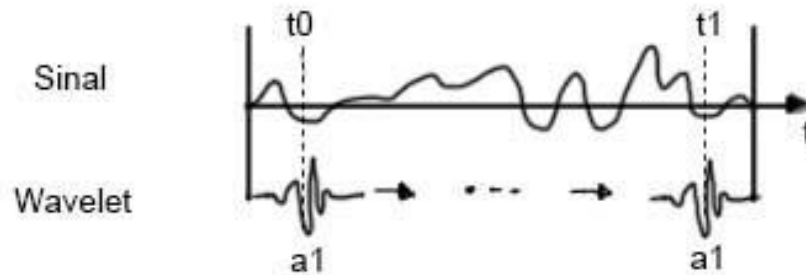
Figura 2.24: Representação gráfica da compressão de uma *wavelet*

$$f(t) = \psi(t) \quad ; \quad a = 1$$

$$f(t) = \psi(2t) \quad ; \quad a = \frac{1}{2}$$

$$f(t) = \psi(4t) \quad ; \quad a = \frac{1}{4}$$

Fonte:(MISITI, 1996)

Figura 2.25: Deslocamento contínuo da *wavelet* no tempo

Fonte: Adaptado de MISITI (1996)

A reconstrução do sinal pode ser feita a partir dos coeficientes obtidos através da equação:

$$x(t) = \frac{1}{c_\psi} \int \int \frac{1}{a^2} CWT(a, b) \hat{\Psi} \left(\frac{t-b}{a} \right) da db \quad (2.21)$$

Em que C_ψ é a condição a qual a *wavelet* mãe deve satisfazer (Equação 2.22). Nesta $\Psi(\omega)$ é a transformada de Fourier da *wavelet* $\Psi(t)$ e esta é nula em $t = 0$, desta forma $\Psi(t)$ é um filtro passa banda. Esta operação é então denominada transformada inversa de *wavelet*.

$$C_\psi = \frac{1}{2\pi} \int \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (2.22)$$

Por fim a distribuição de energia (E) relaciona-se com os coeficientes de acordo com a Equação 2.33. Como a energia no plano tempo-frequência é igual a

energia total no domínio do tempo pode-se recuperar o sinal completamente através dos coeficientes (PENHA, 1999).

$$E = \int |x(t)|^2 dt = \frac{1}{c_\psi} \int \int a^{-2} |CWT(a,b)|^2 da db \quad (2.23)$$

2.4.4 Transformada *wavelet* discreta (DWT)

Como mencionado anteriormente a CWT realiza o deslocamento da função *wavelet* de forma contínua no domínio do tempo. Isso faz com que haja sobreposição dessas funções e consequentemente representação redundante. Além disso a CWT opera continuamente nas escalas, desde o valor da escala original do sinal até o máximo definido pela resolução desejada (MISITI, 1996).

Essa característica da CWT requer um dispendioso trabalho computacional. Por outro lado, é necessária nos casos onde se deseja fazer a análise de fractais, por exemplo. Entretanto, para armazenamento e transmissão do sinal, o ideal é ter o mínimo de informação necessária, ou seja, o menor número de coeficientes de *wavelet* (a e b). Para isso deve-se escolher adequadamente os parâmetros de forma que ainda seja possível recuperar o sinal original de forma eficiente tendo assim uma economia computacional (PENHA, 1999).

Uma forma comum de amostrar os parâmetros é pela discretização da forma $a = a_0^m$ e $b = b_0 n$. Desta forma a definição da *wavelet* mãe (Equação 2.19) torna-se:

$$\Psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \Psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad m e n \in \mathbb{Z} \quad (2.24)$$

Os integradores m e n controlam a dilatação e a translação respectivamente. Já a_0 é um parâmetro de dilatação fixa que deve assumir um valor maior que 1, e b_0 é o parâmetro de localização, o qual deve ser maior que zero. Uma escolha de valores bastante comum é a chamada *dyadic* (ADDISON, 2002). Nesta os valores de a_0 e b_0 são 2 e 1 de forma que a Equação 2.24 seja reescrita como:

$$\Psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \Psi\left(\frac{t - n2^m}{2^m}\right) \quad (2.25)$$

Usando esta definição, a transformada de *wavelet* discreta (DWT) é escrita:

$$T_{m,n} = \sum_{-\infty}^{\infty} x(t)\Psi_{m,n}(t)dt \quad (2.26)$$

E o sinal original pode ser reconstruído em termos dos coeficientes $T_{m,n}$ de acordo com a Equação 2.27.

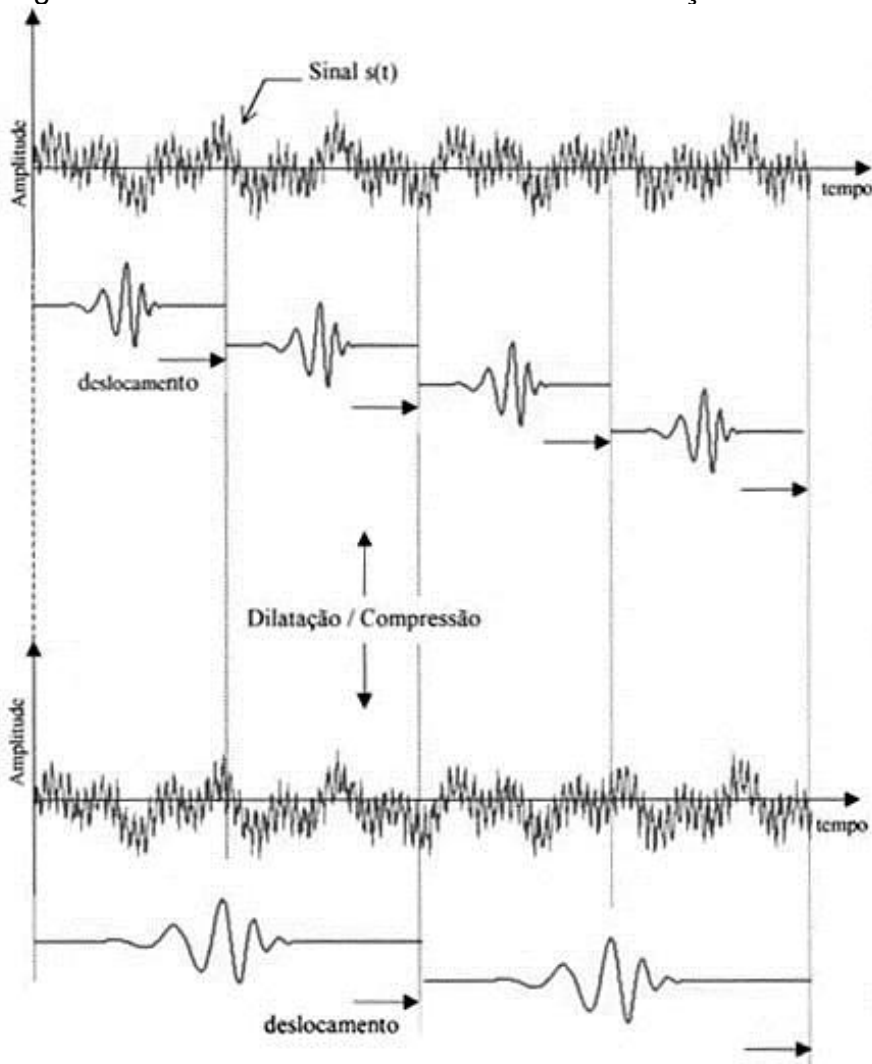
$$x(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} T_{m,n} \Psi_{m,n}(t) \quad (2.27)$$

A Figura 2.26 a seguir exemplifica o processo de dilatação e deslocamento que ocorre na DTW. Para um dado valor de escala 2^m a *wavelet* é transladada no eixo do tempo em n intervalos com duração de 2^m . Em seguida o valor da escala dobra e a translocação ocorre em um intervalo de 2^{m+1} . O índice m é denominado nível de decomposição (PENHA, 1999).

Por fim, a energia do sinal pode ser expressa por:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} |T_{m,n}|^2 \quad (2.28)$$

Figura 2.26: Processo de deslocamento e dilatação da DWT



Fonte: (PENHA, 1999)

2.4.5 Representação multiresolução

A DWT está associada com a função de escalonamento e sua equação de dilatação. Esta função pode ser associada com a suavização do sinal e pode ser escrita com a mesma forma da *wavelet* (Equação 2.29).

$$\phi_{m,n}(t) = 2^{-m/2} \phi(2^{-m}t - n) \quad (2.29)$$

A qual tem a propriedade:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi_{0,0}(t) dt = 1 \quad (2.30)$$

A função $\phi_{m,n}(t)$ é conhecida como *wavelet* pai, quando $\phi_{0,0}(t) = \phi(t)$. Associada ao sinal, esta função pode produzir os denominados coeficientes de aproximação (ADDISON, 2002).

$$A_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\phi_{m,n}(t) dt \quad (2.31)$$

O sinal $x(t)$ pode ser representado pela combinação dos coeficientes de aproximação e os coeficientes da *wavelet*:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{m_0,n}\phi_{m_0,n}(t) + \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} T_{m,n}\Psi_{m,n}(t) \quad (2.32)$$

Desta forma o sinal é composto pela aproximação em uma escala arbitrária m_0 e uma sucessão de coeficientes, os quais podem ser chamados de detalhes. Estes são definidos, em uma escala m , como:

$$D_m(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} T_{m,n}\Psi_{m,n}(t) \quad (2.33)$$

Assim a equação 2.39 pode ser reescrita:

$$x(t) = x_{m_0}(t) + \sum_{m=-\infty}^{m_0} d_m(t) \quad (2.34)$$

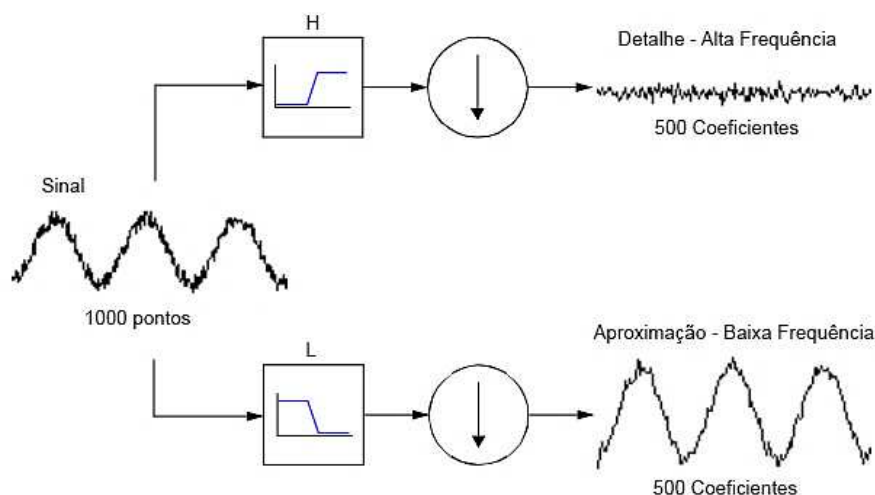
Das Equações 2.33 e 2.34 pode-se afirmar que ao adicionar o detalhe a uma aproximação é obtida a aproximação de maior resolução (em uma escala $m - 1$). Este fato é chamado de representação multiresolução (ADDISON, 2002).

Uma alternativa para calcular os coeficientes da DWT foi desenvolvida por Mallat em 1988. Esta baseia-se em um algoritmo de filtros e sua grande vantagem é que tanto as aproximações como os detalhes são obtidos sem a necessidade do cálculo explícito da função *wavelet* (PENHA, 1999).

O algoritmo é implementado por um banco de filtros constituído de dois blocos: um para decomposição do sinal e outro para reconstrução. Em resumo, o sinal passa por filtros H e L, passa-alta e passa-baixa, respectivamente. Estes filtros geram dois sinais de amostragem numericamente iguais dobrando o número de

amostras do sinal original. Em seguida é feito o *downsampling*, que despreza cada segunda amostra destes sub sinais, conseqüentemente cada um passa a ser metade e dão origem aos coeficientes de aproximação e detalhe da DWT (Figura 2.27).

Figura 2.27: Bloco de decomposição de sinal

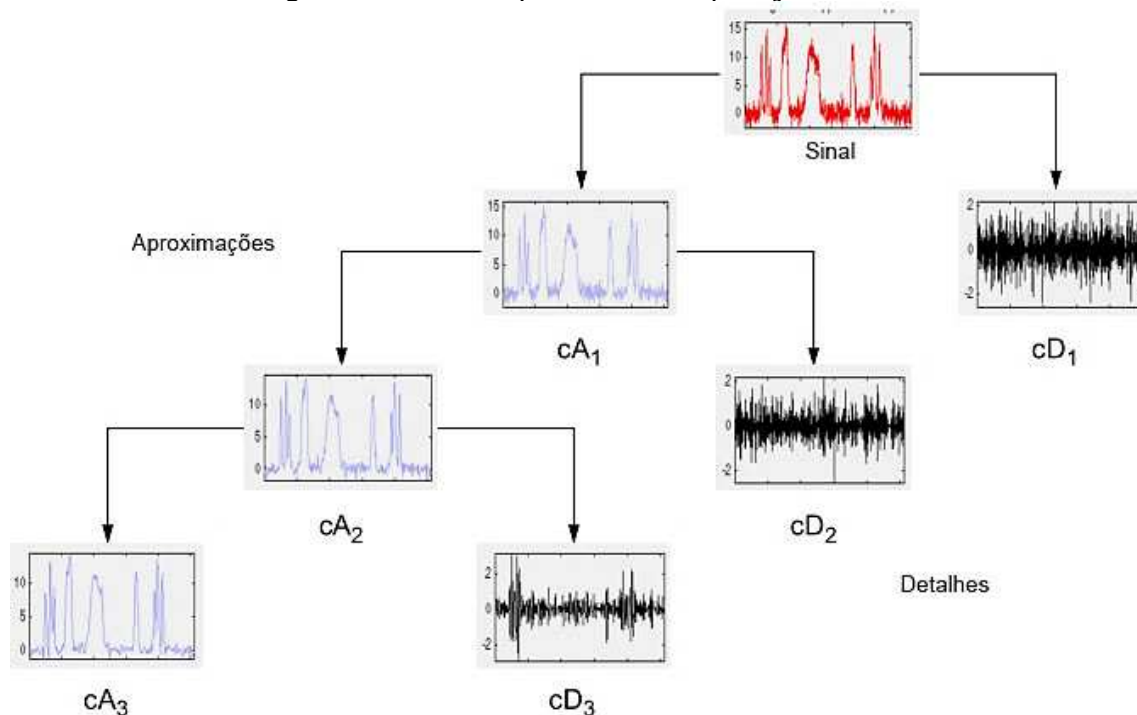


Fonte: Adaptado de (MISITI, 1996)

Enquanto os filtros de passa baixa (L) geram as aproximações dando um efeito de “suavidade” ao sinal, os passa alta (H) são responsáveis por reter as frequências mais altas gerando os detalhes. As aproximações estão mais ligadas à forma ou identidade do sinal e podem ser relacionadas às escalas mais altas (frequência mais baixa) e com as funções de dilatação. Por outro lado, os detalhes estão mais correlatos à função *wavelet* (PENHA, 1999).

A decomposição é aplicada inicialmente no sinal original gerando uma aproximação e um detalhe (identificados por cA1 e cD1 na Figura 2.28). Em seguida o procedimento pode ser reaplicado na aproximação gerada e assim sucessivamente gerando sinais de resolução menor. Este procedimento é conhecido como decomposição em árvore (Figura 2.28). Uma vez que este é um processo iterativo, em teoria, pode ser realizado até que o sinal se torne uma amostragem única. Na prática define-se o nível de decomposição baseando-se na natureza do sinal ou algum critério como a entropia, por exemplo (MISITI, 1996).

Figura 2.28: Exemplo da decomposição em árvore



Fonte: Adaptado de (MISITI, 1996)

O processo inverso, de reconstrução do sinal dá-se através da transformada discreta inversa de *wavelet*. Neste os coeficientes são recombinados a fim de formar o sinal original. Ao contrário da decomposição, a reconstrução faz uso do *upsampling* que dobra o tamanho da amostragem inserindo zeros entre amostras consecutivas. Se houver diversas decomposições o processo inicia-se no ultimo nível e é repetido até a recuperação do sinal original (PENHA, 1999).

Além de reconstruir o sinal pode-se aplicar o procedimento de *upsampling* aos próprios coeficientes ao combinar cada um deles a um vetor de zeros de mesmo tamanho de forma que se criam sub-sinais a partir dos coeficientes de aproximação ou detalhes. Isto permite analisar os componentes do sinal no tempo em bandas de frequências distintas, estando cada uma relacionada a um nível de decomposição. Para os detalhes as janelas de frequência são $[f_s/2^{m+1}, f_s/2^m]$. Já para as aproximações elas são $[0, f_s/2^{m+1}]$. Por exemplo, para um sinal com amostragem de 200Hz, como os sinais utilizados nesta Dissertação, as janelas de frequência estariam de acordo com a Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Janelas de frequência associadas a cada sub-nível

Sub-nível	Janela de frequência dos detalhes (D_m), [Hz]	Janelas de frequência das aproximações (A_m), [Hz]
1	50 – 100	0 – 50
2	25 – 50	0 – 25
3	12,5 – 25	0 – 12,5
4	6,25 – 12,5	0 – 6,25
5	3,125 – 6,25	0 – 3,125
6	1,56 – 3,125	0 – 1,56
7	0,78 – 1,56	0 – 0,78
8	0,39 – 0,78	0 – 0,39
9	0,195 – 0,39	0 – 0,195
10	0,0975 – 0,195	0 – 0,0975

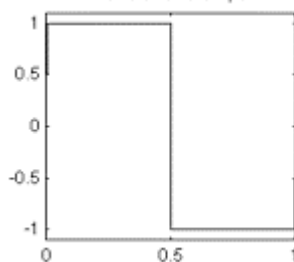
2.4.6 Famílias de *wavelets*

A *wavelet* mãe pode possuir diversas formas. De fato, qualquer função finita no tempo e frequência pode ser uma *wavelet*. A escolha desta função para o processamento do sinal pode variar. Entretanto, de forma geral, é de interesse que a forma da *wavelet* seja comparável ao fenômeno que está se estudando, pois assim haverá uma similaridade acentuada e conseqüentemente os coeficientes terão valores altos.

Dentre as famílias de *wavelets* mais conhecidas pode-se citar a Haar, biortogonais, coeﬀlet, Daubechies, Meyer e symlets.

Haar

Apesar do crescente interesse na transformada *wavelet* na última década do ponto de vista histórico ela não é novidade. Seus fundamentos remetem a 1909 com a dissertação de Alfred Haar. Sua pesquisa em sistemas ortogonais apresenta que qualquer função contínua pode ser descrita por um conjunto de funções retangulares. Estas pesquisas, mais tarde, deram origem à família de *wavelets* mais simples (GAO; YAN, 2011).

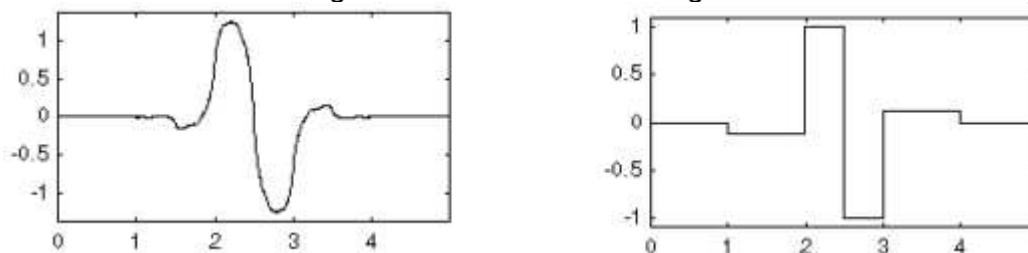
Figura 2.29: *Wavelet* Haar

Fonte: Adaptado de (MISITI, 1996)

Por sua simplicidade (Figura 2.29), os cálculos com esta *wavelet* são rápidos e ela pode detectar informações localizadas no tempo com facilidade. Entretanto, por tratar-se de uma função degrau, não é recomendada na reconstrução de sinais mais “suaves”(DOGRA *et al.*, 2012).

Biortogonais

As biortogonais são constituídas de pares de funções (Figura 2.30), um para a decomposição e outro para a reconstrução. Por isso, possuem um grau de liberdade a mais se comparada às ortogonais. Elas possuem propriedades de simetria e perfeita reconstrução de sinais e imagens, condição impossível de ser alcançada com *wavelets* ortogonais. (DOGRA *et al.*, 2012).

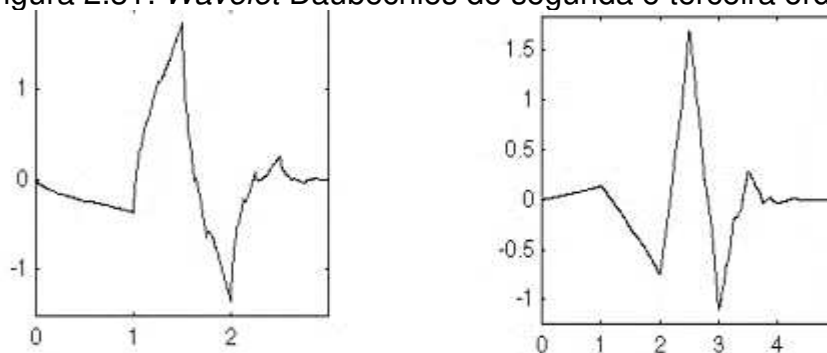
Figura 2.30: *Wavelet* biortogonal

Fonte: Adaptado de (MISITI, 1996)

Daubechies

Esta família tem o nome de seu criador Ingrid Daubechies, o qual a inventou e tornou possível a análise de *wavelet* discreta (MISITI, 1996). O nome desta família é expresso da forma dbN, em que N é sua ordem. As ordens mais usadas em aplicações práticas são a db2 e db20 (DOGRA *et al.*, 2012).

Figura 2.31: *Wavelet* Daubechies de segunda e terceira ordem



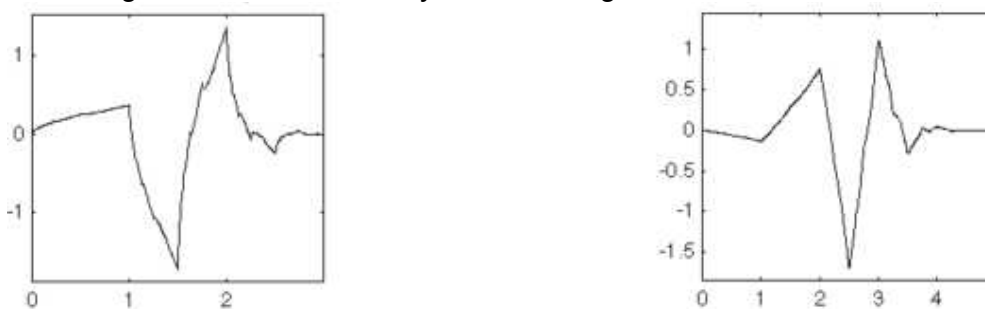
Fonte: Adaptado de (MISITI, 1996)

As Daubechies são bastante utilizadas na área de processamento de imagens e solução de polinômios. Elas são assimétricas e não possuem função explícita, mas podem ser definidas por equações funcionais e seus coeficientes são calculados por algoritmos de fácil implementação (PENHA, 1999).

Symlets

As Symlets são *wavelets* de características similares às Daubechies. Foram propostas pelo mesmo criador como modificação da família dbN. A diferença entre elas está no fato das Symlets serem mais simétricas (Figura 2.32).

Figura 2.32: *Wavelet* Symlets de segunda e terceira ordem

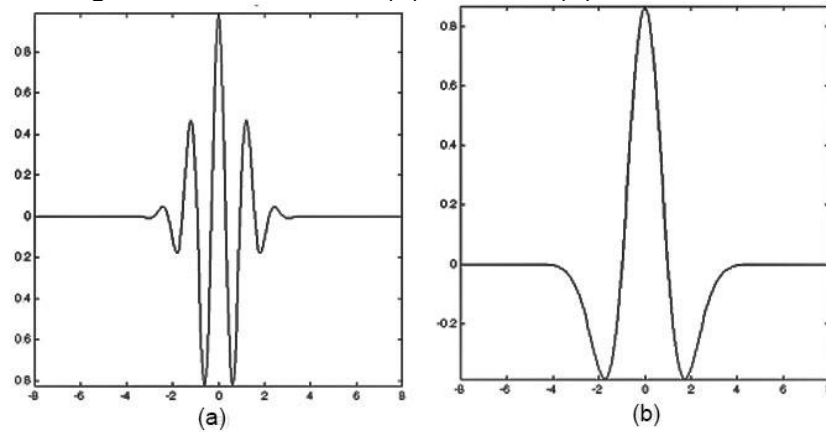


Fonte: Adaptado de (MISITI, 1996)

Morlet e *mexican-hat*

As *wavelets* Morlet e *mexican-hat* (a e b respectivamente na Figura 2.33) não permitem análise ortogonal. Logo, a reconstrução do sinal não pode ser assegurada. Em geral são usadas na CWT (PENHA, 1999).

Figura 2.33: *Wavelets* (a) Morlet e (b) *mexican-hat*

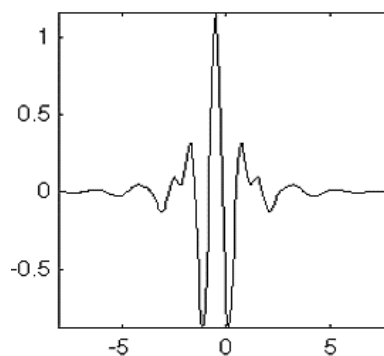


Fonte: Adaptado de (MISITI, 1996)

Meyer

A Meyer pode ser usada na DWT, mas apenas pela análise ortogonal e não pelo algoritmo de filtros de Mallat (como as Daubechies). Ela é infinitamente regular e não pode ser definida por um número finito de coeficientes. Além disso seu algoritmo é lento (PENHA, 1999).

Figura 2.34: *Wavelet* Meyer



Fonte: Adaptado de (MISITI, 1996)

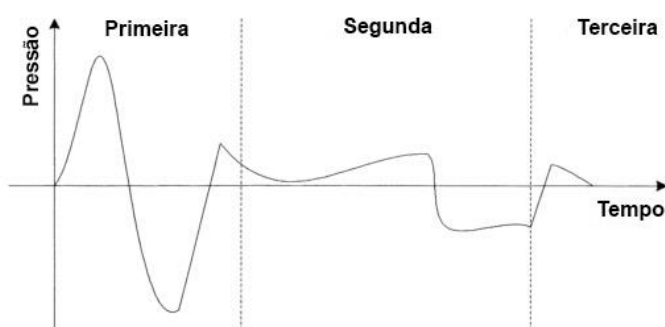
2.4.7 Transformada *wavelet* aplicada à identificação de regimes fluidodinâmicos

Na seção 2.4.1 foi apontada a importância e a variedade de aplicações das transformadas de *wavelet* em diversas áreas. Entretanto ainda é necessário verificar como esta técnica está sendo utilizada na pesquisa em leitos fluidizados.

VAN OMMEN *et al.* (2011) afirmam que uma das principais vantagens da *wavelet* é sua capacidade natural de separar frequências. Logo, sua utilização torna-se interessante na fluidização, uma vez que este é um fenômeno multiescalar, ou seja, seu sinal é tipicamente composto de ocorrências em micro, meso e macro escalas as quais estão relacionadas com bandas de frequências. As frequências mais altas são associadas ao movimento das partículas, as intermediárias a aglomerados de partículas e as baixas ao movimento do gás e passagem das bolhas (VAN OMMEN *et al.*, 2011).

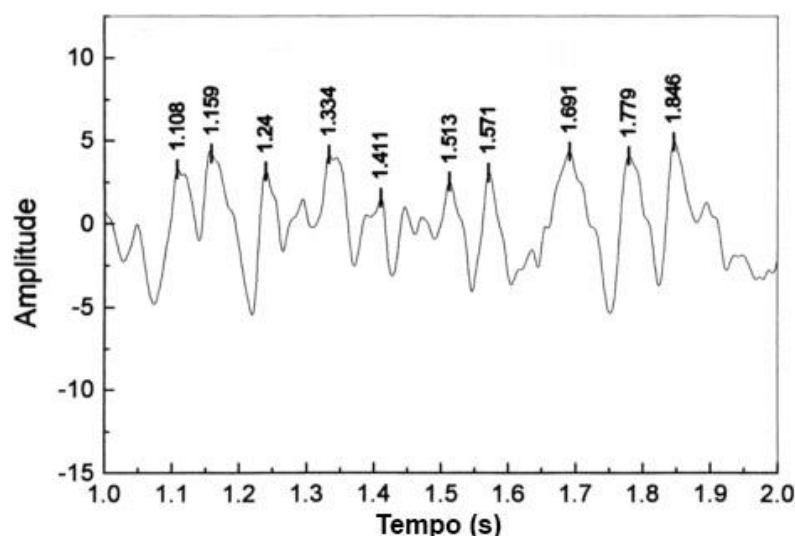
Em 1999 LU e LI utilizaram a DWT em sinais de pressão para caracterizar o borbulhamento de um leito fluidizado. Os autores citam que a propagação de uma bolha através do leito pode ser dividida em três etapas. A primeira corresponde à formação da bolha, a segunda à ascensão e a terceira à sua erupção na superfície do leito. Como pode-se observar na Figura 2.35, apenas a formação das bolhas provoca uma grande flutuação de pressão. Desta forma utilizou-se a DWT e análise multirresolução para separar estes picos de pressão dos outros fenômenos. Na Figura 2.36 pode-se ver as variações máximas de pressão identificadas como formação de bolhas na escala 4 dos detalhes. Assim, os autores concluíram que é possível relacionar a frequência dos picos com a frequência das bolhas e o valor da amplitude com o tamanho das mesmas.

Figura 2.35: Esquema da resposta do leito a passagem do gás



Fonte: Adaptado de (LU; LI, 1999)

Figura 2.36: Picos obtidos da escala 4 dos detalhes obtidos por Lu e Li (1999)

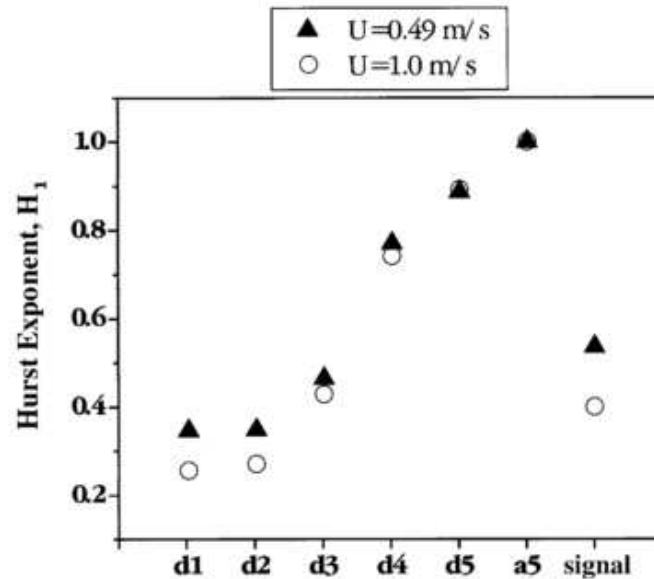


Fonte: Adaptado de (LU; LI, 1999)

LI (2002) aplicou a análise multirresolução em sinais de pressão proveniente de um fluxo gás-sólido em um tubo horizontal. Foi utilizada a análise visual do sinal decomposto em dez componentes, RMS (do inglês *root mean square*) da pressão, coeficiente de assimetria (*skewness*) e PDF (do inglês *Probability Density Function*) das diferentes bandas de frequência. Foi encontrado que velocidades elevadas do gás resultam em componentes maiores de RMS a altas frequências, enquanto baixas velocidades produzem valores altos de RMS a baixas frequências. A baixas velocidades, a PDF apresentou a mudança de um pico único para um bipartido.

A transformada de *wavelet* também foi aplicada a sinais obtidos por sondas de fibra óptica em condições de regime turbulento. Usando a Daubechies de quinta ordem, ELLIS *et al.* (2003) decompôs este sinal em cinco níveis (4 detalhes e uma aproximação) e utilizou os expoentes de Hurst para caracterizar a diferença entre os regimes turbulento e borbulhante. Na Figura 2.37 pode-se observar que os valores de H_1 para altas frequências (detalhes d1 e d2) são menores para o regime turbulento e maiores para o regime borbulhante. Além disso conclui-se que a análise utilizando a transformada de *wavelet* foi tão sensível quanto a análise de caso no que diz respeito a caracterização dos regimes.

Figura 2.37: Expoentes de Hurst da decomposição do sinal de porosidade utilizado por Ellis *et al.* (2003)



Como discutido anteriormente a escolha da família de *wavelet* é importante tanto para decomposição como para a reconstrução do sinal. ZHAO e YANG (2003) estudaram os erros causados pela decomposição do sinal pelas *wavelets* da família Daubechies. Foi definido o erro como a diferença entre o sinal original ($x(t)$) e sua reconstrução ($\hat{x}(t)$) de acordo com a Equação 2.35.

$$Erro = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |x(t) - \hat{x}(t)| \quad (2.35)$$

A Daubechie de segunda ordem foi a que apresentou os melhores resultados para sinais de pressão no trabalho em questão. Além disso os autores utilizaram a análise de Hurst para agrupar os coeficientes em micro, meso e macro escala.

Escolhida a *wavelet* mãe, outro fator importante na análise *wavelet* é a escolha apropriada do nível de decomposição. O número ótimo pode ser relacionado com a quantidade de informação residual no sinal. Para isso, alguns autores (TAHMASEBPOUR *et al.*, 2013; TAMADONDAR *et al.*, 2014) utilizaram a entropia de Shannon a qual pode ser interpretada como uma medida de informação, desta forma a decomposição deve continuar até o nível em que a entropia atinja seu valor mínimo e permaneça constante.

De forma geral, a entropia de Shannon é definida pela Equação 2.36, em que p é uma distribuição de probabilidade e k é uma constante positiva.

$$S = -k \sum p \log_b(p) \quad (2.36)$$

Para as decomposições obtidas pela *wavelet* é definida a WEE (do inglês *Wavelet Energy Shannon Entropy*) que pode ser tratada como a entropia de Shannon modificada. Nela, a distribuição de probabilidade é relacionada com a energia dos coeficientes da *wavelet* (YANG; WANG, 2015). Desta forma tem-se:

$$WEE = - \sum_{k=1}^k p_k \log_2 p_k \quad (2.37)$$

$$p_k = \frac{|wt(j, k)|^2}{E(j)} \quad (2.38)$$

Em que $E(j)$ é a energia no nível de decomposição j , $wt(j, k)$ é o k -ésimo coeficiente no nível j e $\sum p_k = 1$. Além disso a base do logaritmo determina a unidade da entropia. Quando b é igual a 2, como foi definido na Equação 2.37 a unidade é *bits*, mas também é comum "e" e 10, nas quais as unidades serão *nat* e *Hartely* (ZHENGYOU *et al.*, 2011).

A caracterização dos regimes fluidodinâmicos foi feita por diversos autores utilizando a energia dos coeficientes em diferentes níveis de decomposição (CHEW *et al.*, 2014; GENG *et al.*, 2014; JIANG *et al.*, 2012; TAHMASEBPOUR *et al.*, 2013; TAMADONDAR *et al.*, 2014; VAN OMMEN *et al.*, 2011). A energia de um sinal é definida pela soma quadrática de sua amplitude.

$$E = \sum_{t=1}^N |x(t)|^2 \quad (2.39)$$

Também são definidas as energias dos detalhes (E_m^D) e da aproximação (E_m^A) de forma semelhante.

$$E_m^D = \sum_{t=1}^N |D_m(t)|^2 \quad (2.40)$$

$$E_m^A = \sum_{t=1}^N |A_m(t)|^2 \quad (2.41)$$

A energia total é dada pela soma das energias de cada sub-nível:

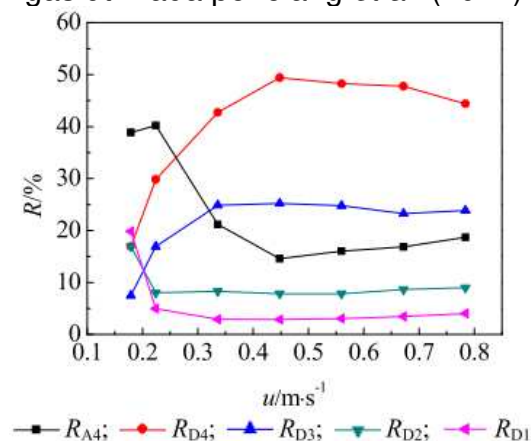
$$E_T = \sum_{m=1}^M E_m^D + E_m^A \quad (2.42)$$

Entretanto a distribuição da energia entre os diferentes níveis é mais facilmente observada pela energia relativa:

$$R_m^D = \frac{E_m^D}{E_T} \times 100\% \quad (2.43)$$

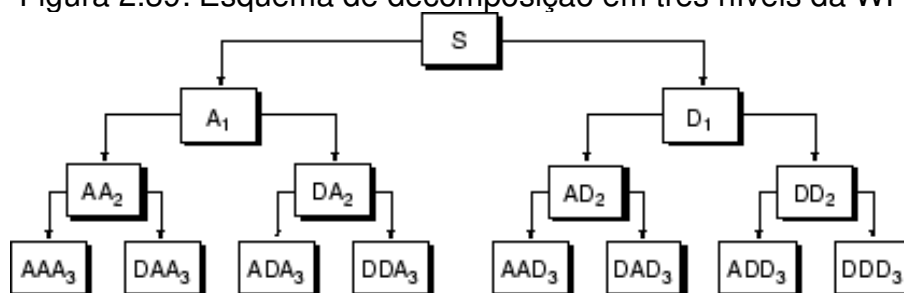
Em seu estudo sobre o monitoramento de leitos gás-sólido utilizando sinais de pressão e variando fluxo de gás, altura do leito e tamanho de partícula JIANG *et al.* (2012) constataram que o incremento da velocidade superficial do gás provoca decaimento acentuado das energias associadas as frequências mais altas (D1 e D2) (Figura 2.38). Entre 0,224 e 0,448 m/s as energias RD4 e RD3 aumentam gradualmente. Logo em seguida as energias permanecem constantes. Estes fatos possibilitaram identificar a região de leito expandido (até 0,179 m/s) pelo decaimento de RD1 e RD2. Uma região de transição onde o borbulhamento era crescente e a completa fluidização com a estabilização das energias.

Figura 2.38: Distribuição de energia relativa em função da velocidade superficial do gás utilizada por Jiang *et al.* (2012)



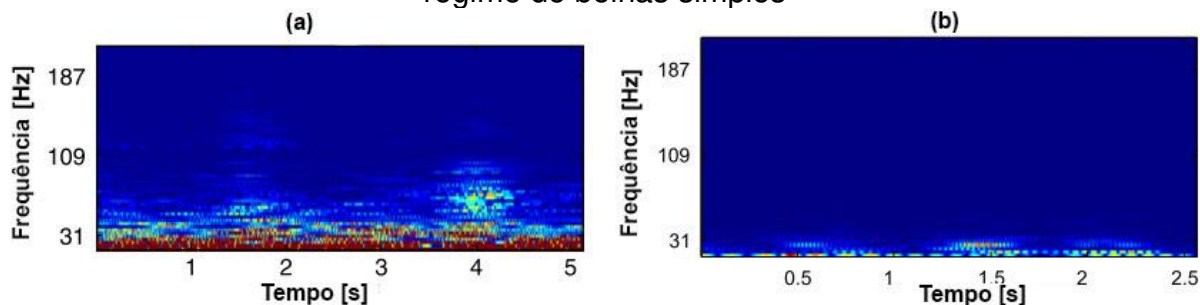
VAN OMMEN *et al.* (2011) obtiveram resultado semelhante ao constatar que o borbulhamento promove picos de energia nos detalhes de frequências intermediárias e os correlaciona com as flutuações de pressão causadas pela passagem das bolhas. O autor utilizou a *wavelet packet* (WP) que, diferentemente da DWT, decompõe os detalhes em novas aproximações (Figura 2.39). O *plot* dos coeficientes obtidos da WP (Figura 2.40) mostrou-se útil para identificar o regime de explosão de bolhas e o de bolhas simples.

Figura 2.39: Esquema de decomposição em três níveis da WP



Fonte: Adaptado de (VAN OMMEN *et al.*, 2011)

Figura 2.40: *Plot* dos coeficientes da WP para (a) regime de explosão de bolhas (b) regime de bolhas simples



Fonte: Adaptado de (VAN OMMEN *et al.*, 2011)

SILVA (2015) estudou o monitoramento de um processo de recobrimento de partículas a fim de evitar a defluidização do leito. Dentre as análises realizadas, o autor utilizou a transformada *wavelet* no sinal de flutuação de pressão. Foram realizadas dez decomposições utilizando a família Daubechie de terceira ordem e o tratamento dos sinais foi baseado na energia dos sub-sinais, entretanto foram feitos processamento de sinais tanto *off-line* como *on-line*. Nos ensaios foi constatado que os sub-sinais 5, 6, 7 e 8 reduziram suas energias progressivamente conforme o tempo de atomização. Este fato foi relacionado com a desestabilização fluidodinâmica, ou seja, redução na quantidade de bolhas. Já os sub-sinais 9 e 10

aumentaram seu conteúdo de energia indicando uma tendência para dinâmica de baixa frequência (formação do leito expandido).

Em resumo a *wavelet* apresenta-se como uma ferramenta promissora tanto para análise de fenômenos fluidodinâmicos como para identificação de regimes. Contudo, a simples separação do sinal fornecida pela DWT e seus coeficientes necessitam de análises estatísticas auxiliares cabendo ao pesquisador decidir quais são adequadas para cada situação.

Capítulo 3 - Material e Métodos

3.1 Material

Os sinais utilizados neste trabalho foram adquiridos por CASTILHO *et al.*, (2011) durante sua pesquisa realizada na Faculdade de Ciências Químicas da Universidade Complutense de Madri - Espanha (UCM) e tratados no Laboratório de Processos em Meios Porosos (LPMP) na Faculdade de Engenharia Química da Unicamp. Para isso foram utilizados três tipos de partículas (Tabela 3.1) e ar comprimido como fase fluida.

Tabela 3.1: Caracterização das partículas

Partícula	Massa Específica ρ_s (kg/m ³)	Diâmetro de partícula d_p (μ m)	Esfericidade (Φ_s)	Classificação de Geldart
Esferas de vidro (1)	2527	280	0,96	B
Esferas de vidro (2)	2469	1120	0,96	D
Areia (3)	2525	246	0,84	B

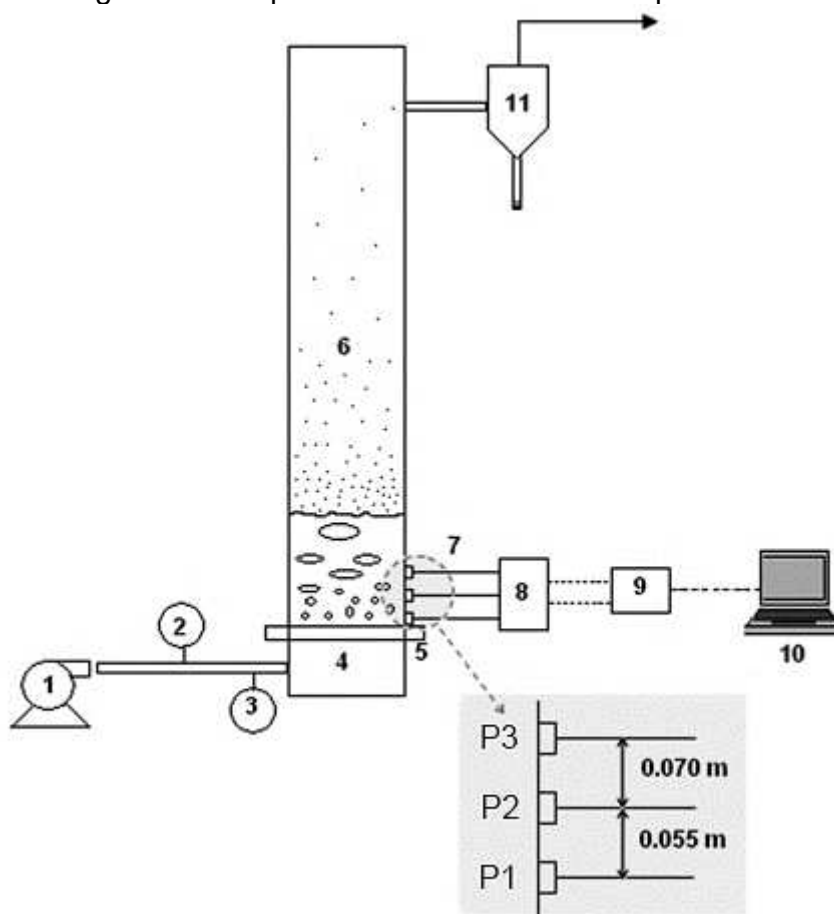
Fonte: Adaptado de CASTILHO *et al.*, (2011)

Os diâmetros de partícula foram determinados por CASTILHO *et al.* (2011) segundo o diâmetro médio de Sauter mediante peneiramento. Os histogramas que descrevem a distribuição de tamanhos de partículas encontram-se na Figura A 1 em anexo.

3.2 Sistema experimental

O sistema experimental era composto por uma coluna cilíndrica de acrílico e possuía um diâmetro interno de 7 cm e altura de 100 cm (Figura 3.1). Além disso, o distribuidor era uma placa com sete campanas, cada uma com oito furos. Quanto ao ar comprimido, este se encontrava a uma temperatura próxima a 15°C e pressão de 2 bar para velocidades de 0,4 m/s e 3 bar para as velocidades entre 0,4 m/s e 0,7 m/s.

Figura 3.1:Esquema do leito fluidizado experimental



(1) Soprador; (2) Válvula de pressão; (3) Rotâmetro; (4) Câmara de ar; (5) Distribuidor; (6) Leito; (7) Sondas de pressão; (8) Transdutores de pressão; (9) Conversor analógico/digital; (10) Computador; (11) Ciclone

Fonte: Adaptado de CASTILHO *et al.* (2011)

A vazão de ar foi controlada manualmente através dos rotômetros, indicados por (3) na Figura 3.1. No total foram utilizados três rotômetros fabricados pela Kytola Instruments (EK-4BR-H para vazão até 20 L/min; LH-8RR-H para 100 L/min e A-8DR para 200 L/min). Para a aquisição dos dados de pressão realizou-se por meio de transdutores de pressão (PR3110) com limites operacionais na faixa de 0 a 200 mbar (referidos como P1, P2 e P3 na Figura 3.1). Os transdutores foram conectados a um módulo de entrada analógica da *National Instruments* (NI 9205) com resolução de 16 bits e taxa de amostragem de 250 kS/s. Uma placa de aquisição de dados (NI cDAQ-9172) da mesma fabricante conectava o módulo ao computador, no qual o *software LabView 8.5* fazia a aquisição dos dados (CASTILHO *et al.*, 2011).

3.3 Métodos

Foram utilizados três transdutores de pressão diferencial para a aquisição dos dados, coletados a uma frequência de 2000 Hz durante 300 segundos. As séries resultantes tinham cerca de 600.000 pontos.

Os experimentos foram iniciados em condição de leito fixo. Em seguida a vazão de ar foi aumentada gradualmente até atingir-se a fluidização. As vazões máximas para os sólidos 1, 2 e 3 foram de 80, 140 e 20 L/min respectivamente. Por fim, fez-se o procedimento reverso – diminuir a vazão de ar – para verificar o comportamento do leito expandido (CASTILHO, 2011).

Os sinais de pressão utilizados para o levantamento da curva de fluidização foram aqueles correspondentes ao transdutor P1. Já para o processamento de sinais foram empregados os dados do transdutor posicionado na parte superior do leito (P3, Figura 3.1). Nesta posição, o sinal é mais sensível podendo captar perturbações oriundas a aparecimento ou explosões de bolhas (CASTILHO *et al.*, 2011).

Apesar dos sinais terem sido coletados a frequência de 2000 Hz, estes foram reamostrados através de linhas de comando no *software* Matlab® para séries de 60.000 pontos (200 Hz). JOHNSON *et al.* (2000) afirmam que na maioria dos leitos fluidizados as frequências dominantes estão na ordem de 1 a 5 Hz e que o conteúdo de informações que o sinal de pressão fornece está abaixo de 10 Hz. Logo, as séries com 200 Hz são suficientes para a grande maioria das análises que podem ser realizadas.

3.3.1 Curva de Fluidização

Para construir a curva de fluidização foram usados os dados coletados na posição P1. Cada ponto de pressão na curva corresponde a uma série temporal obtida. Assim usa-se o valor médio do sinal de acordo com a Equação 2.7 apresentada na seção 2.3.1.

A partir da curva de ΔP em função da velocidade superficial do gás, primeiramente crescente e em seguida decrescente, estimou-se a velocidade de mínima fluidização experimental (U_{mf}). Para isso tanto a pressão como a velocidade

foram representadas em escala logarítmica e, em seguida, ajustou-se uma reta utilizando os pontos que correspondem ao leito expandido, obtidos sequencialmente em velocidade decrescente. Outra reta foi traçada pelos pontos correspondentes ao leito fluidizado. A velocidade de mínima fluidização encontra-se na intersecção destas retas, como exemplificado na Figura 2.3.

3.3.2 Velocidade de Mínima Fluidização Teórica

A velocidade de mínima fluidização teórica foi calculada de acordo com as propriedades físicas das partículas e do leito apresentadas anteriormente. Inicialmente estima-se a queda de pressão na condição de mínima fluidização:

$$-\Delta P_{mf} = \frac{g \cdot m_p}{A_t} \quad (3.1)$$

Em que A_t é a área transversal do leito cilíndrico. A seguir estimou-se a porosidade na mínima fluidização como descrito na Equação 3.2. Em que a altura considerada corresponde ao leito expandido.

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{-\Delta P_{mf}}{L_{mf}(\rho_s - \rho_g)} \quad (3.2)$$

Por fim utiliza-se a Equação de Ergun na condição de mínima fluidização (Equação 3.3) para calcular a velocidade superficial do gás com a ressalva que a metodologia empregada só é validada para fluidização homogênea. Desta forma os resultados são apenas estimativas para fins comparativos, especialmente para as partículas do tipo D.

$$\frac{-\Delta P_{mf}}{L_{mf}} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\mu U_{mf}}{(\Phi_s d_p)^2} + 1,75 \frac{1 - \varepsilon_{mf}}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\rho_g U_{mf}^2}{\Phi_s d_p} \quad (3.3)$$

3.3.3 Desvio padrão das flutuações de pressão

O desvio padrão foi calculado a partir de sinais obtidos pelo transdutor P3 na série de pontos correspondente ao ensaio de volta, ou seja, para vazões de ar decrescentes. Para isso foram utilizadas as Equações 2.7 para calcular a média da série e 2.6 para o cálculo do desvio padrão.

Com o desvio padrão em função da velocidade pode-se obter a U_{mf} ao traçar uma reta na fração em que o σ apresenta crescimento linear. A velocidade de mínima fluidização encontra-se no cruzamento desta reta com o eixo das abscissas como foi demonstrado na Figura 2.4.

3.3.4 Aplicação da transformada *wavelet*

O processamento dos sinais obtidos em P3 foi realizado para cada velocidade de ar obtida durante a diminuição da vazão do gás e, de forma preliminar, para duas famílias de *wavelets* utilizando o Matlab *Wavelet* Toolbox®. Optou-se por escolher a *wavelet* Daubechie de segunda ordem (db2) pois a mesma apresentou os melhores resultados para sinais de pressão em leito fluidizado de acordo com ZHAO e YANG (2003). A *wavelet* da família Meyer (dmey), foi escolhida porque seu formato adequa-se a perturbação causada pelas passagens das bolhas no sinal de pressão como sugerido por VAN OMMEN *et al.* (2011).

O erro em função da velocidade foi calculado a partir do sinal reconstruído e o sinal original como descrito por ZHAO e YANG (2003) na Equação 2.35. Para isso o sinal foi decomposto em dez detalhes e uma aproximação. Em seguida o sinal foi reconstruído a partir dos coeficientes previamente obtidos.

O erro em função do nível de decomposição foi calculado pela mesma definição de erro absoluto médio apresentado na Equação 2.35. Como o objetivo era avaliar a influência do nível de decomposição no erro fixou-se a velocidade. O ponto escolhido para cada tipo de partícula (Tabela 3.2) baseou-se no maior erro encontrado quando se estudou a variação do erro em função da velocidade. Para as partículas 1 e 3 estes pontos estavam em região de leito fluidizado. Já para a partícula 2 foi selecionada a maior velocidade disponível quando os dados foram coletados com a diminuição da velocidade do gás, ou seja, da condição de fluidização para o leito expandido.

Tabela 3.2: Casos selecionados para cálculo do erro em função do nível de decomposição

Partícula	Velocidade [m/s]
1	0,078
2	0,520
3	0,078

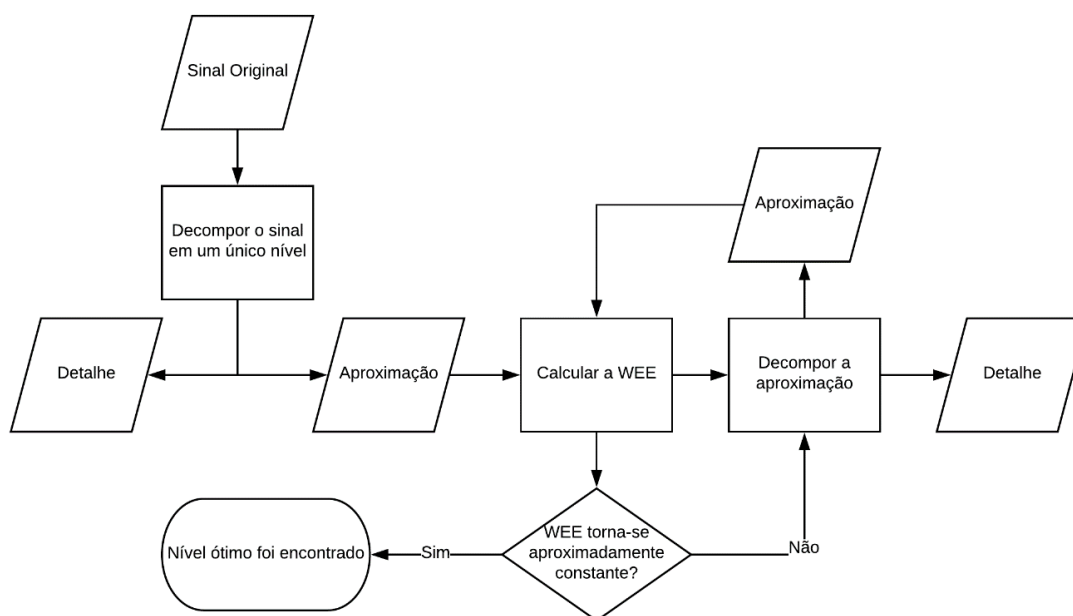
Inicialmente, o sinal foi decomposto em apenas um nível e em seguida reconstruiu-se o sinal a partir dos coeficientes obtidos e calculou-se o erro. Este procedimento foi repetido para dois, três até doze níveis de decomposição. Além disso foram avaliadas as *wavelets* de segunda a décima ordem da família Daubechies.

3.3.5 Entropia de Shannon aplicada a *wavelet*

A *wavelet energy Shannon entropy* (WEE) foi calculada para as três partículas a fim de encontrar o nível ótimo de decomposição do sistema. Para isso foram aplicadas as Equações 2.38 e 2.39 com as mesmas séries apresentadas na Tabela 3.2.

Para realizar os cálculos foi criado um breve *script* no *software* Matlab®. Sua lógica é a mesma que MISITI (1996) utiliza para exemplificar a aplicação da entropia para determinar se uma nova decomposição é de interesse. O procedimento é apresentado no fluxograma da Figura 3.2.

Figura 3.2: Procedimento para encontrar o nível ótimo de decomposição



Fonte: Elaborada pelo autor

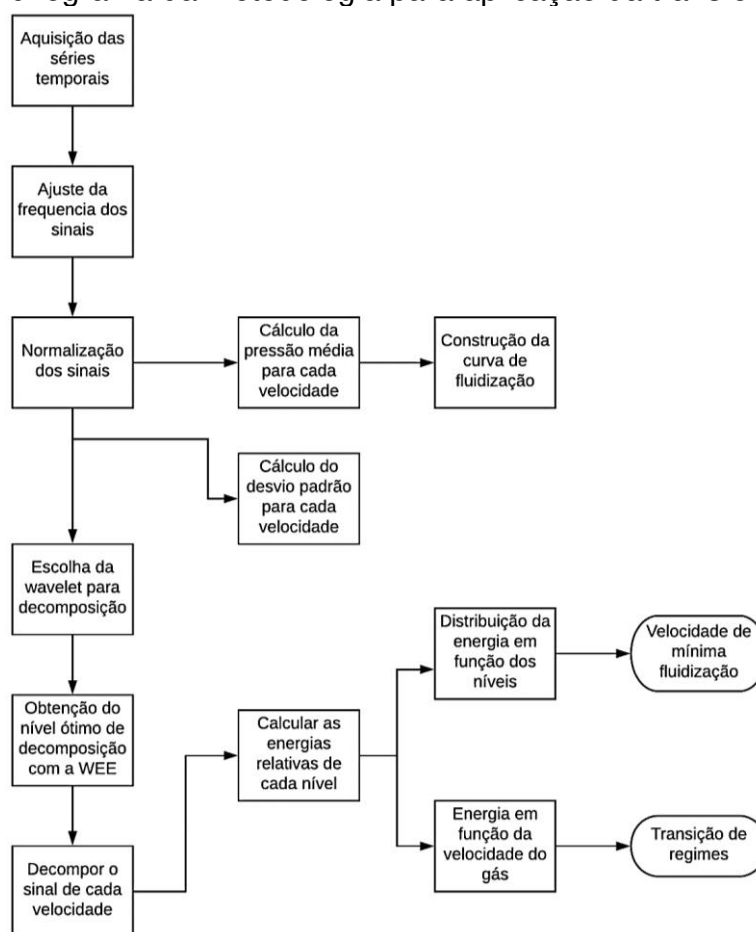
3.3.6 Cálculo dos níveis de energia

A energia de cada nível de decomposição foi calculada de acordo com as Equações 2.39 a 2.43 como definido anteriormente. Para caracterização dos regimes fluidodinâmicos foi utilizada a energia relativa.

3.3.7 Resumo da metodologia e tomadas de decisão

O fluxograma da Figura 3.3 resume a metodologia empregada desde a aquisição das séries temporais até a obtenção dos gráficos de distribuição de energia. Estes gráficos foram construídos de duas maneiras. A distribuição de energia em função dos sub-níveis possibilita encontrar as velocidades de mínima fluidização com mais clareza enquanto a distribuição das energias dos respectivos sub-níveis em função da velocidade do gás facilita a visualização dos regimes fluidodinâmicos.

Figura 3.3: Fluxograma da metodologia para aplicação da transformada *wavelet*



Fonte: Elaborada pelo autor

Capítulo 4 - Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos sinais de pressão em leito fluidizado para os três tipos de partículas avaliados. Os sinais foram analisados primeiramente por métodos estatísticos no domínio do tempo para dar base a comparação e em seguida utilizou-se a transformada *wavelet* para decomposição do sinal e obtenção da distribuição da energia. Os resultados também serão comparados àqueles obtidos pela análise de caos apresentados por CASTILHO *et al.* (2011).

4.1 Curva de fluidização

As curvas de fluidização foram construídas com as medias temporais de cada série a partir dos dados coletados pelo transdutor P1 localizado sobre o distribuidor. As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam estes resultados para as partículas 1, 2 e 3 respectivamente.

Figura 4.1: Curva de fluidização para partícula 1

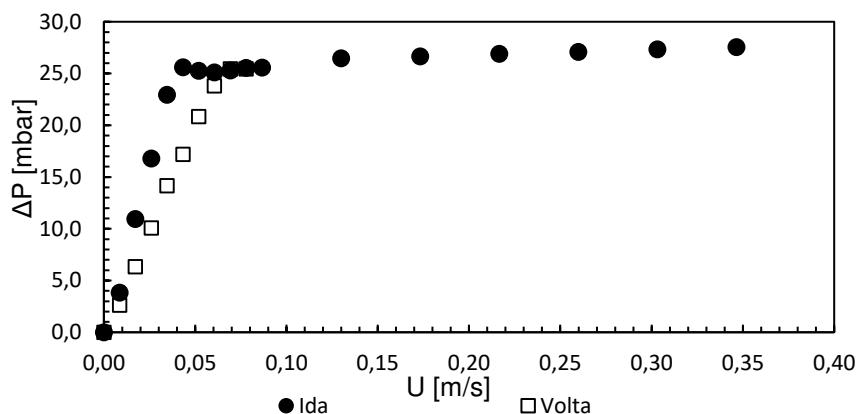


Figura 4.2: Curva de fluidização para partícula 2

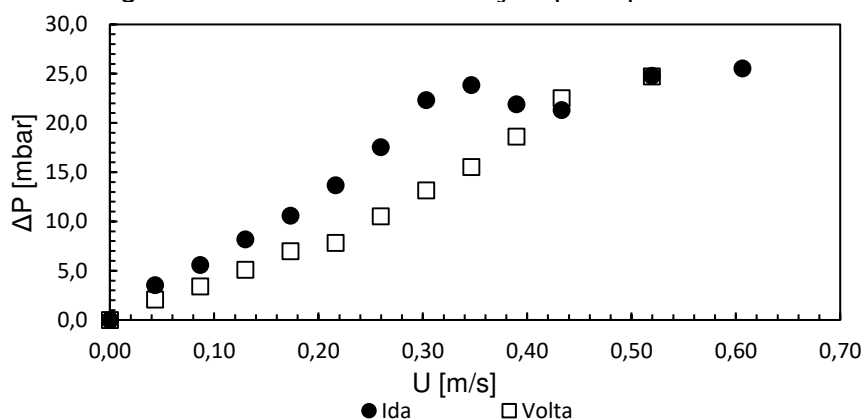
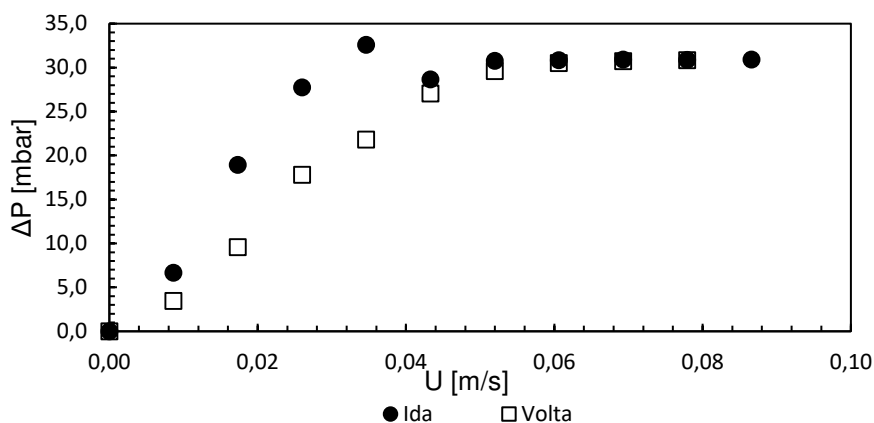


Figura 4.3: Curva de fluidização para partícula 3



Como pode-se observar o comportamento das partículas 1 e 3 são semelhantes e suas velocidades de mínima fluidização possuem a mesma ordem de grandeza. Este fato era esperado uma vez que estes possuem propriedades físicas semelhantes (Tabela 3.1) e ambas se classificam como tipo B, mesmo grupo de Geldart.

A partir das curvas construídas pôde-se identificar com clareza duas regiões. A primeira em que a queda de pressão apresenta uma relação praticamente linear com a velocidade superficial do ar, correspondente ao regime de leito expandido. Nesta há maior resistência à passagem do ar e, em geral, não há movimentação das partículas. À medida que a velocidade se aproxima da mínima fluidização o movimento das partículas se intensifica. A segunda região pode ser observada apenas para as partículas 1 e 3 e corresponde ao leito em regime borbulhante característico das partículas do tipo B de Geldart. A partícula 2 apresenta propriedades físicas de partículas D e necessita de maiores velocidades para iniciar a fluidização, nota-se a necessidade de velocidades dez vezes maior para observar movimentação das partículas se comparado com os particulados 1 e 3.

4.2 Velocidades de mínima fluidização

A velocidade de mínima fluidização é encontrada pela intersecção das retas correspondentes à região de leito expandido e à de fluidização completa. Assim como proposto por KUNII e LEVENSPIEL (1991) os gráficos foram construídos na forma de logaritmo. Já as estimativas teóricas foram calculadas pela

equação de Ergun apresenta na seção 3.2.2 As U_{mf} estão sumarizadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Velocidades de mínima fluidização experimentais a partir das curvas de fluidização

Partícula	U_{mf} experimental [m/s]	U_{mf} teórica [m/s]
1	0,066	0,075
2	0,550	0,520
3	0,047	0,053

O método gráfico foi melhor aplicado para as partículas 1 e 3, as quais apresentaram com maior distinção as regiões de leito expandido e fluidização. Para estas partículas foi possível traçar com maior clareza as retas representativas de cada região, como pode ser observado nas Figuras 4.4 e 4.6. A fim de se obter as velocidades com maior precisão as retas foram traçadas com auxílio de *software* (Microsoft Excel®) e o ponto de intersecção encontrado a partir de suas respectivas equações. Por outro lado, a partícula 2 não apresentou pontos suficientes para boa representação da região de fluidização (Figura 4.5), primeiramente por limitação do equipamento que não atingiu velocidades superiores a 0,60 m/s e também pela própria característica da partícula, a qual pertence ao grupo D da classificação de Geldart, consideradas como “jorráveis”. Estas necessitariam de grande quantidade de gás assim como um aparato com geometria cônica para propiciar um processo do tipo jorro. Como esperado, no experimento avaliado neste trabalho, a fluidização não foi verificada, tendo em vista a própria curva de fluidização (Figura 4.2). Quando as velocidades de mínima fluidização experimentais são comparadas com as teóricas presentes na Tabela 4.1, observa-se que para a partícula 1 o valor teórico encontrado é superior em aproximadamente 14%. O mesmo fato é observado para a partícula 3 em que a U_{mf} teórica é cerca de 13% maior do que aquela obtida experimentalmente. Já para a partícula 2, verificou-se o inverso, apesar da velocidade de mínima fluidização teórica ser inferior a experimental a diferença verificada foi de apenas 0,03 m/s. Estes resultados indicam que na condição de mínima fluidização há boa correlação entre as hipóteses adotadas quando se utiliza a equação de Ergun (fase diluída comportando-se como fluido newtoniano incompressível, regime permanente, porosidade constante ao longo do leito,

escoamento uniforme e unidimensional) e o que foi observado experimentalmente. Ainda assim, cabe a ressalva que as equações utilizadas são validas apenas em fluidização homogênea.

Figura 4.4: Gráfico log-log para determinação da U_{mf} para partícula 1

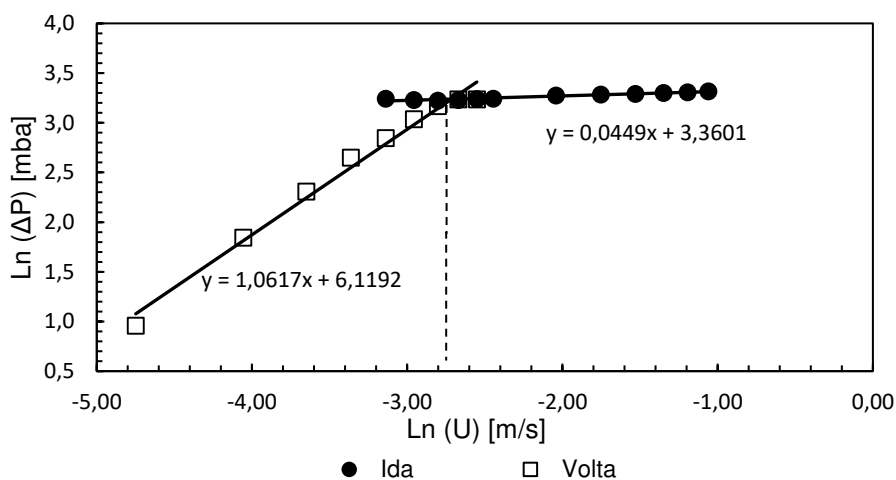


Figura 4.5: Gráfico log-log para determinação da U_{mf} para partícula 2

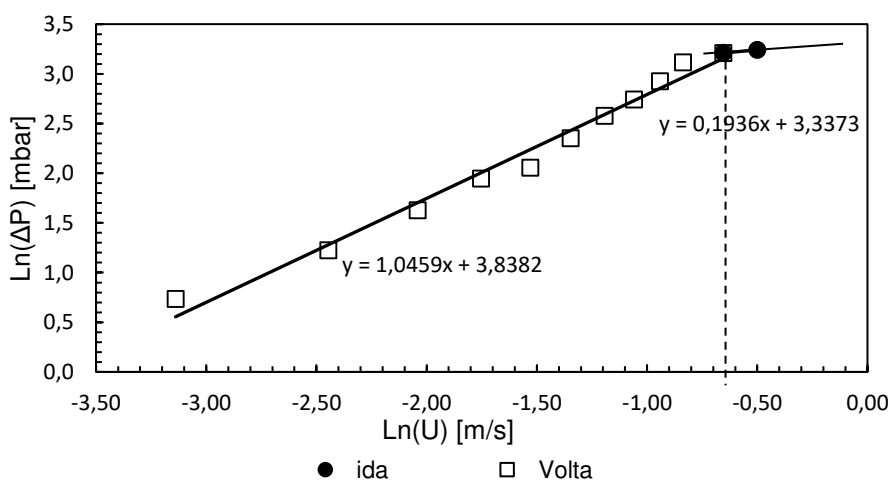
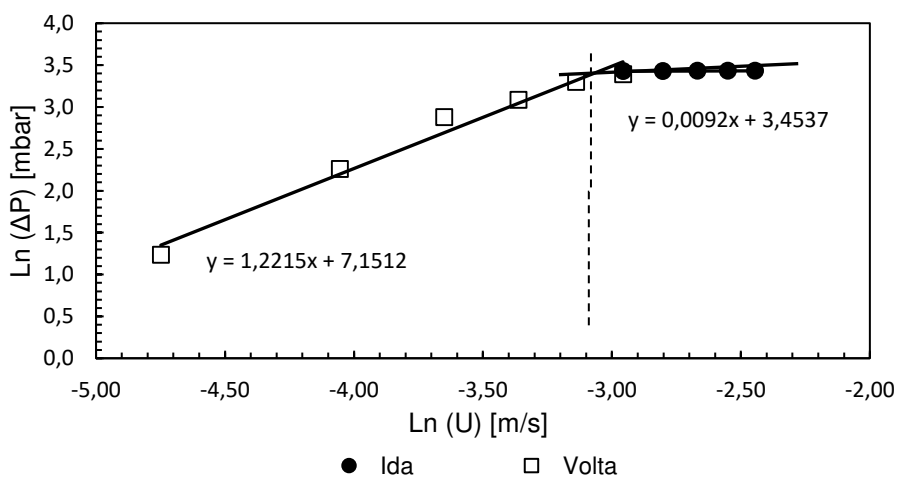


Figura 4.6: Gráfico log-log para determinação da U_{mf} para partícula 3



4.3 Desvio padrão das flutuações de pressão

As Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 apresentam os resultados das distribuições de desvio padrão para as partículas 1, 2 e 3 respectivamente. A velocidade de mínima fluidização pode ser obtida pela intersecção da reta correspondente ao crescimento linear do desvio padrão com o eixo das abcissas. Estas se encontram na Tabela 4.2

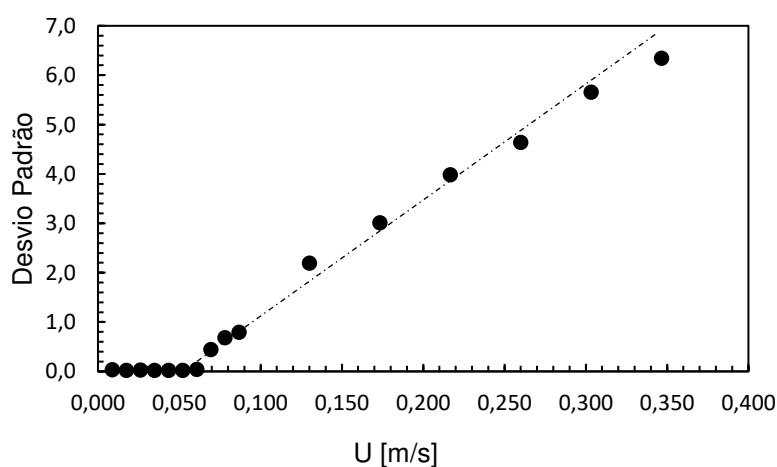
Tabela 4.2: Velocidades de mínima fluidização experimental a partir do desvio padrão

Partículas	U_{mf} experimental [m/s]
1	0,060
2	0,430
3	0,035

Para todas as partículas as velocidades de mínima fluidização apresentaram valores menores do que aquelas obtidas a partir da curva da queda de pressão, em especial para a partícula 3.

Analisando as figuras verifica-se que o desvio padrão apresenta valor praticamente nulo para as condições de leito expandido. Para a partícula 1 (Figura 4.7) o desvio padrão só se eleva após 0,06 m/s. Se comparado ao resultado apresentado na Tabela 4.1, em que a velocidade de mínima fluidização foi obtida a partir da curva de fluidização, nota-se que a U_{mf} aferida pelo desvio padrão é cerca de 10% menor.

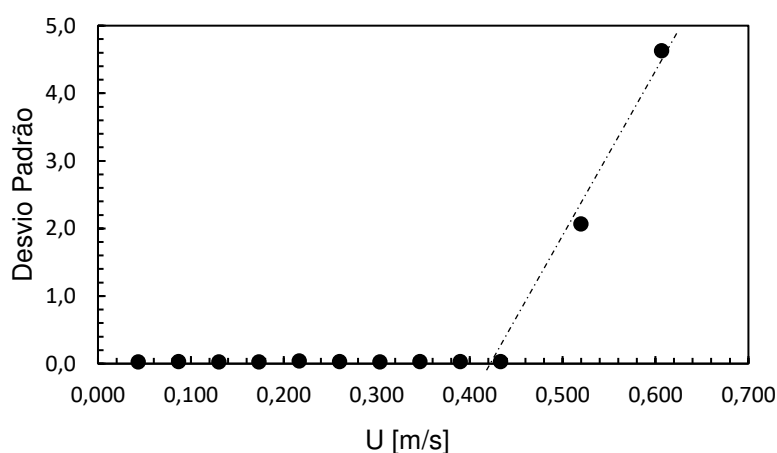
Figura: 4.7: Desvio padrão da partícula 1



O desvio padrão da partícula 2 apresentou apenas dois pontos não nulos reafirmando que os dados experimentais caracterizavam, em quase sua totalidade, o

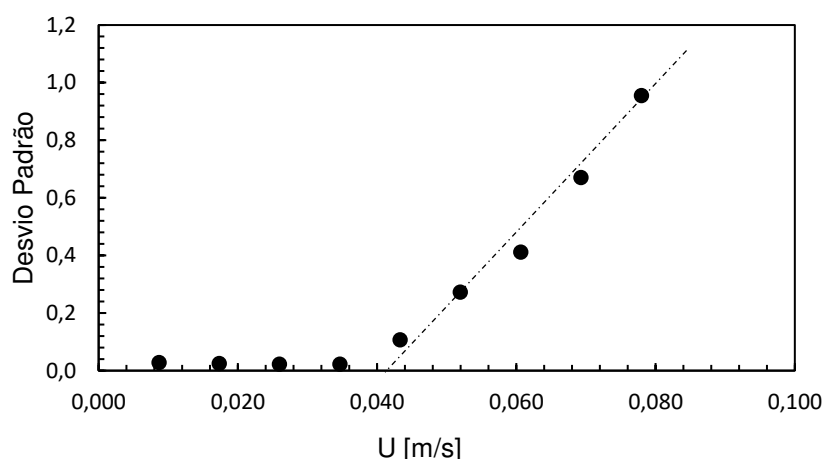
regime de leito expandido. Na Figura 4.8 nota-se que próximo ao valor de 0,43 m/s o desvio padrão eleva-se rapidamente, assim o valor da velocidade em que o leito deixa de ser expandido pelo desvio padrão foi aproximadamente 15% menor do que o valor experimental apresentado na Tabela 4.1. Para melhor avaliar este tipo de partícula seria necessário um leito de geometria adequada, de fundo cônico, para jorrar a partícula e promover sua mistura ou em diminuir a massa que foi carregada no leito. PRIETO (2014) obteve uma curva característica de leito fluidizado mesmo com partículas do tipo D e demonstrou que há diferença significativa no processo quando se varia a massa de carregamento utilizada. O autor relata uma diminuição próxima a 25% da velocidade de mínima fluidização acarretada por diminuição de 50% da massa. Desta forma seria possível obter mais pontos experimentais apesar da limitação do aparato.

Figura 4.8: Desvio padrão da partícula 2



O desvio padrão para a partícula 3 apresenta um aumento logo após 0,035 m/s região que foi identificada claramente como leito expandido na curva de fluidização. Se comparada com a velocidade de mínima fluidização experimental obtida anteriormente (Tabela 4.1), nota-se um valor 25% menor, uma diferença mais acentuada do que aquela observada para as partículas 1 e 2. Neste caso o desvio padrão demonstrou um aumento na flutuação de pressão antes do ponto de mínima fluidização determinado pela curva de fluidização, indicando que já haveria alguma movimentação de partículas no leito.

Figura 4.9: Desvio padrão da partícula 3



4.4 Flutuações de pressão

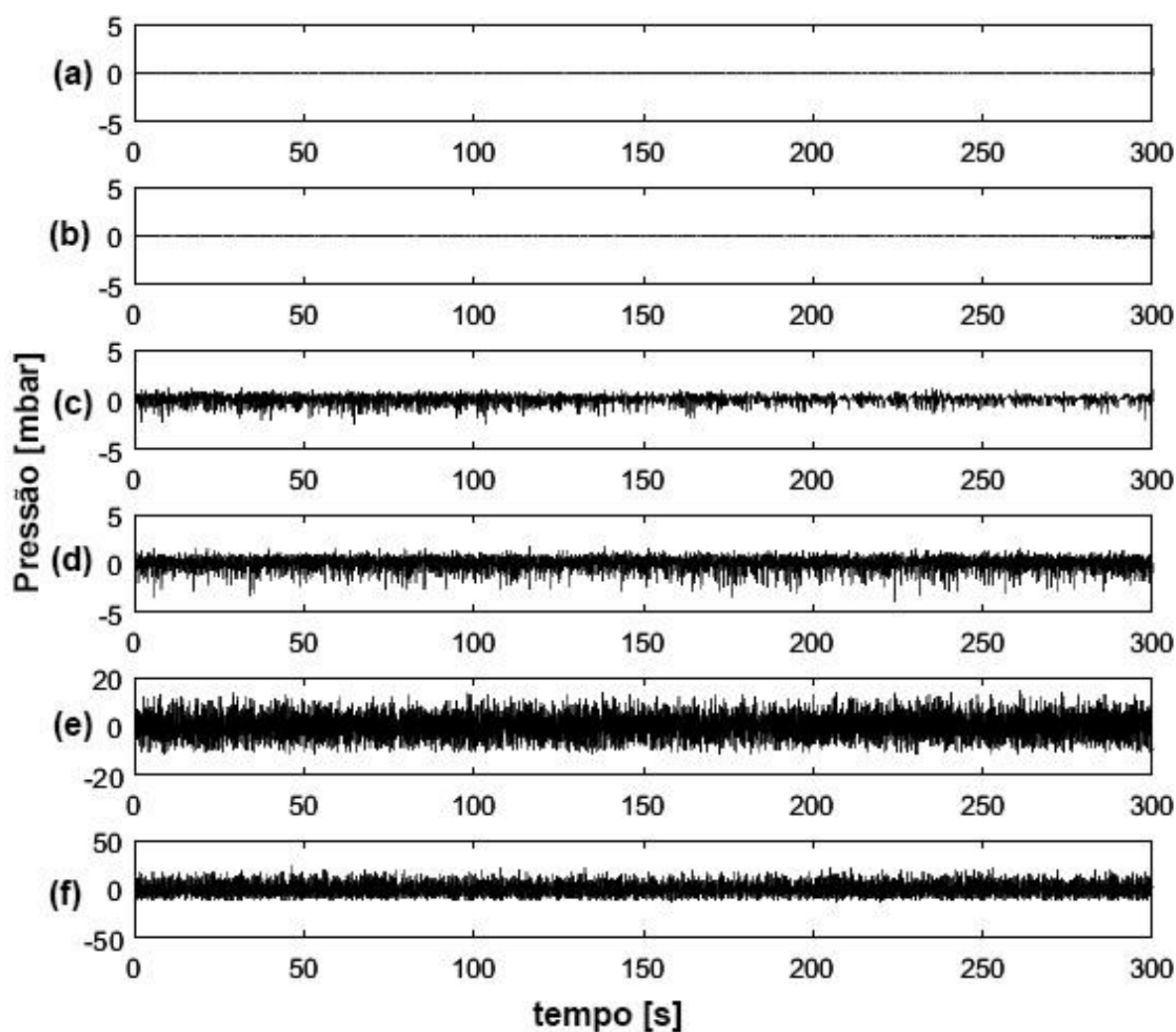
A seguir serão apresentados exemplos de séries obtidas, sendo que determinados casos são para velocidades menores do que a de mínima fluidização (leito expandido) e outros para velocidades maiores (leito fluidizado). O critério de escolha para quais series temporais apresentar foram pontos em torno da velocidade de mínima fluidização obtidos pelas curvas de fluidização apresentadas nas Figuras 4.4 a 4.6. Cabe ressaltar que a análise foi sempre realizada com os pontos utilizando velocidades superficiais de gás decrescentes, a fim de evitar o efeito da descompactação do leito.

Tabela 4.3: Séries temporais selecionadas

Partícula 1		Partícula 2		Partícula 3	
U (m/s)	Condição	U (m/s)	Condição	U (m/s)	Condição
0,052	Leito expandido	0,043	Leito expandido	0,017	Leito expandido
0,061	Leito expandido	0,217	Leito expandido	0,043	Leito expandido
0,069	Mínima fluidização	0,390	Leito expandido	0,052	Mínima Fluidização
0,078	Leito fluidizado	0,433	Leito expandido	0,061	Leito fluidizado
0,260	Leito fluidizado	0,520	Mínima fluidização	0,078	Leito fluidizado
0,346	Leito fluidizado	0,606	Leito fluidizado	0,087	Leito fluidizado

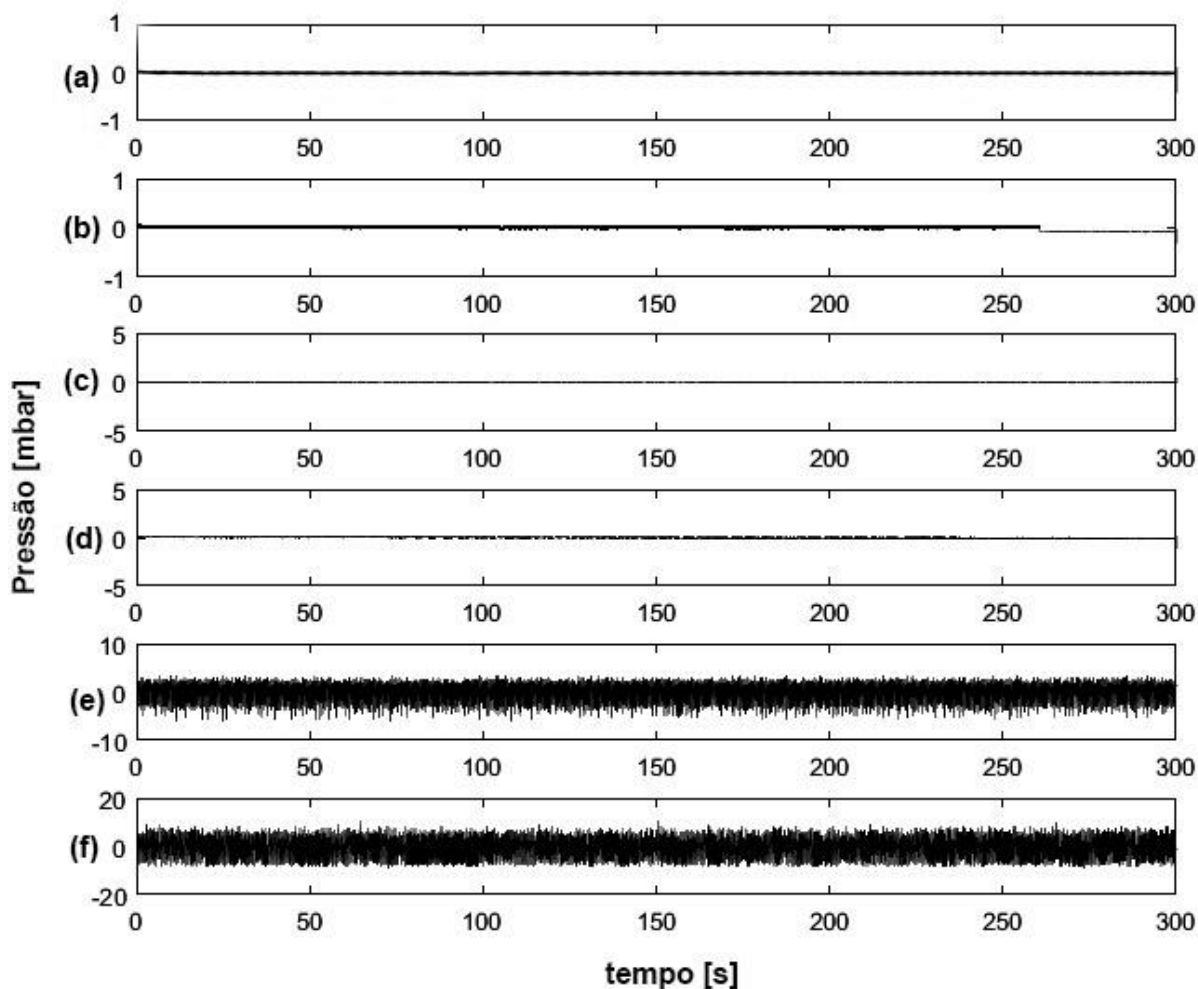
Na Figura 4.10 (c) pode-se observar a ampliação abrupta da variação de pressão, coincidente com a velocidade de mínima fluidização experimental observada para a partícula 1, assim foi adotado este ponto (0,069 m/s) como referência para as análises futuras. O mesmo acontece com a partícula 2, em que a amplitude do sinal aumenta quando a velocidade passa de 0,433 para 0,520 m/s (Figura 4.8).

Figura 4.10: Sinais de pressão referentes a partícula 1 (a) 0,052; (b) 0,061; (c) 0,069; (d) 0,078; (e) 0,260; (f) 0,346 m/s



Fonte: Elaborada pelo autor

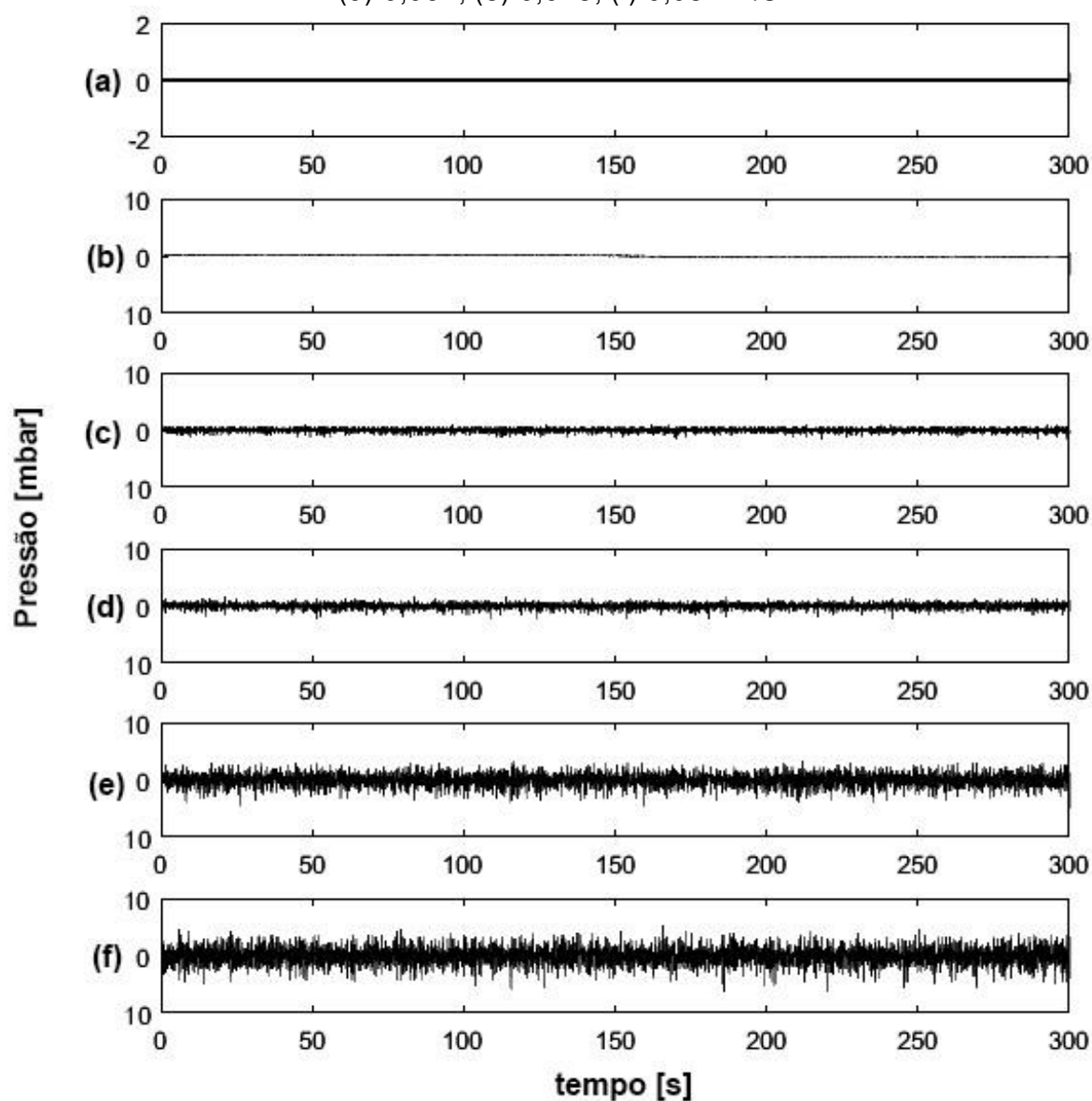
Figura 4.11: Sinais de pressão referentes a partícula 2 (a) 0,043; (b) 0,217; (c) 0,390; (d) 0,433; (e) 0,520; (f) 0,606 m/s



Fonte: Elaborada pelo autor

A areia (partícula 3) apresentou uma fluidização com desenvolvimento progressivo. A visualização da Figura 4.12 reafirma o que foi constatado com a análise do desvio padrão. Nota-se o aumento gradual da amplitude do sinal, porém, com uma mudança de comportamento entre as séries b (0,043 m/s) e c (0,052 m/s). É justamente entre estes pontos em que se encontra a U_{mf} obtida pela curva de fluidização.

Figura 4.12: Sinais de pressão referentes a partícula 3 (a) 0,017; (b) 0,043; (c) 0,052; (d) 0,061; (e) 0,078; (f) 0,087 m/s



Fonte: Elaborada pelo autor

4.5 Erro em da reconstrução dos sinais pela transformada *wavelet* em função da velocidade

Foram utilizadas duas famílias de *wavelets* nesta análise. A *wavelet* Meyer, sugerida por VAN OMMEN *et al.* (2011), devido ao seu formato mais simétrico e arredondado similar a perturbações causadas pelo surgimento das bolhas, e a Daubechies, utilizada por ZHAO e YANG (2003). Ambas as *wavelets* apresentaram erro crescente com a velocidade após o leito iniciar a fluidização, podendo até ser

um indicativo do princípio da fluidização com comportamento semelhante ao desvio padrão dos sinais.

As Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 apresentam o erro absoluto médio entre o sinal reconstruído em dez níveis e o sinal original para as partículas 1, 2 e 3 respectivamente. Pode-se observar que a *wavelet* da família Daubechie apresentou um desvio menor na reconstrução do sinal sendo que este encontra-se na ordem de 10^{-13} . Já o sinal reconstruído com a *wavelet* da família Meyer apresentou erro da ordem de 10^{-7} .

Em ambos os casos o erro permaneceu constante na região em que se observou o comportamento de leito expandido e aumentou rapidamente com o início da fluidização.

Figura 4.13: Erro absoluto em função da velocidade para partícula 1

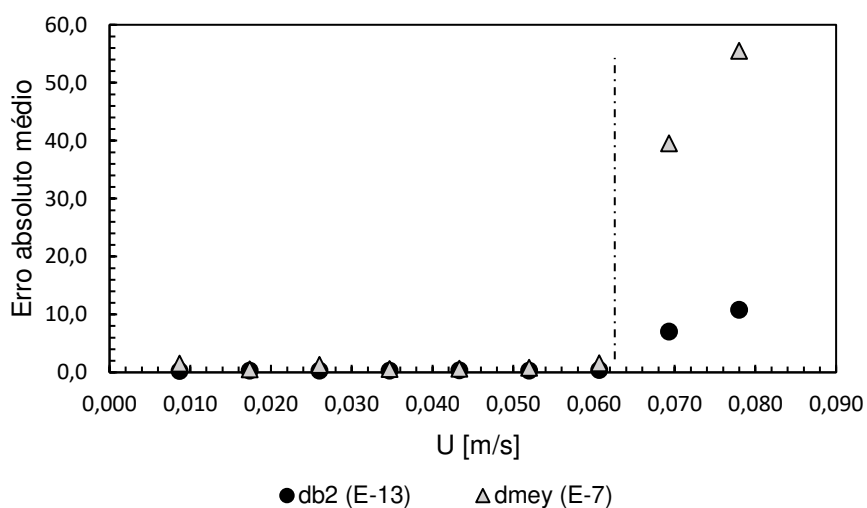


Figura 4.14: Erro absoluto em função da velocidade para partícula 2

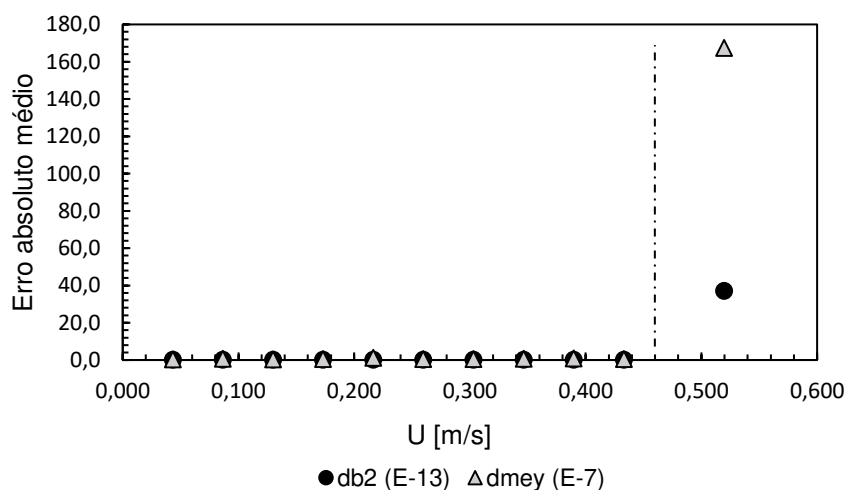
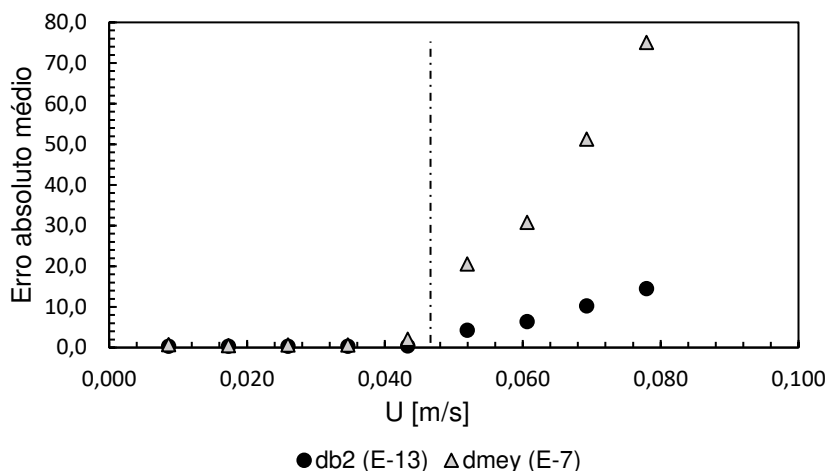


Figura 4.15: Erro absoluto em função da velocidade para partícula 3



4.6 Erro em função do nível de decomposição

Em relação ao nível de decomposição estudou-se a família Daubechies, já que esta apresentou a melhor reconstrução do sinal para toda a faixa de velocidade do ar analisada. Este mesmo critério foi utilizado por ZHAO e YANG (2003).

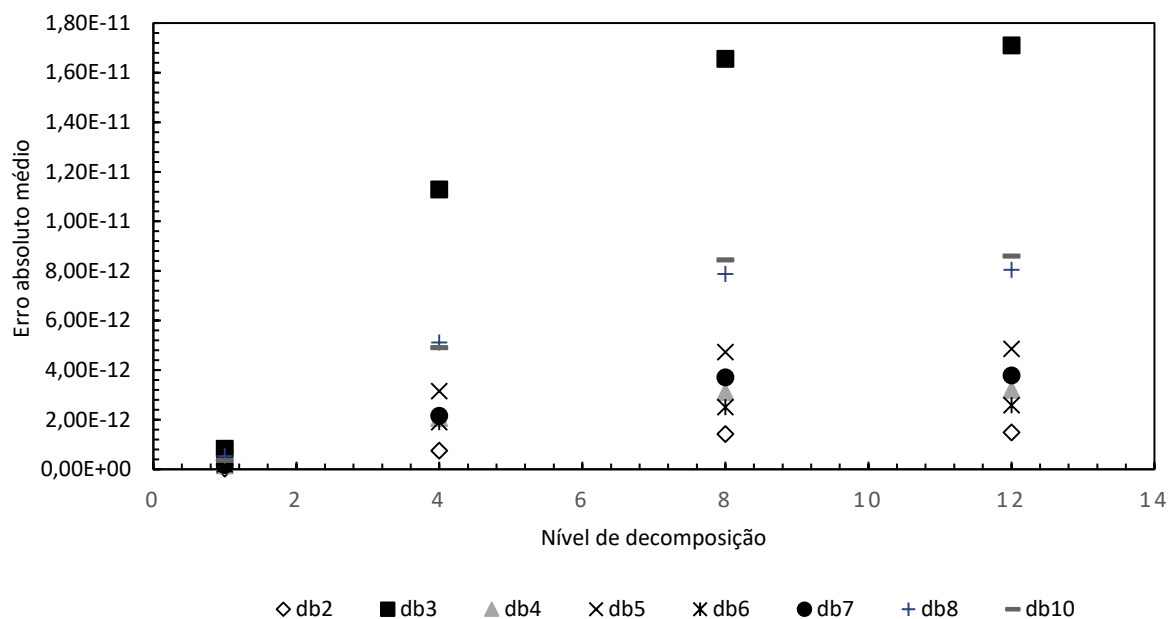
As Figuras de 4.16 a 4.18 apresentam o erro absoluto médio em função do nível de decomposição para as partículas 1 a 3, respectivamente. Entretanto, somente para a partícula 1 foram avaliados todos os níveis de decomposição. As Figuras 4.17 e 4.18 confirmam os resultados observados para a partícula 1, porém apenas com os níveis 1,4,8 e 12.

A Figura 4.16 mostra que o menor erro entre o sinal original e sua reconstrução é obtido com a db2 (*wavelet* da família Daubechies de ordem dois). Já o pior resultado encontrado relaciona-se com a db9 que não consta no gráfico, pois sua ordem de grandeza supera as demais. O mesmo resultado é observado para os demais tipos de partículas.

Além disso, é possível concluir que o erro aumenta com o nível de decomposições, mas após o sexto nível ele permanece constante. Este fato é mais facilmente observado para a Daubechie de ordem três (db3), na Figura 4.16.

A Figura 4.18, referente à fluidização da areia, reafirma o que foi observado para a partícula 1, referente à fluidização de esferas de vidro do tipo B. Por outro lado, a partícula 2, do tipo D, apresenta a possibilidade de utilizar a Daubechie de ordem seis (db6) com a mesma precisão na reconstrução para ordens maiores (8 e 12) do que a db2 (Figura 4.17). Entretanto para manter a uniformidade das futuras

Figura 4.18: Erro absoluto em função do nível de decomposição para a partícula 3



4.7 Uso da entropia para escolha do nível de decomposição

Definida a função *wavelet* que será utilizada na análise, o próximo passo é definir qual será o nível de decomposição para o sinal. Para isso utilizou-se a entropia modificada de Shannon ou do inglês *Wavelet Energy Shannon Entropy (WEE)* como critério (TAHMASEBPOUR; ZARGHAMI; MOSTOUFI, 2013; TAMADONDAR *et al.*, 2014). Os resultados são apresentados nas Figuras 4.19 a 4.21.

Como discutido anteriormente, o nível de decomposição ótimo é encontrado quando a entropia modificada de Shannon atinge um valor mínimo e torna-se constante. Isso acontece, pois, esta entropia é calculada a partir da energia da aproximação do nível de decomposição desejado, que por sua vez está relacionada com a “força” do sinal, ou seja, a variação da amplitude. A medida que se eleva o nível de decomposição, a amplitude do sinal referente a aproximação diminui, já que parte das frequências estão sendo filtradas e alocadas nos detalhes. Desta forma, a aproximação de um sinal decomposto em vários níveis será mais suave, logo mais previsível e conseqüentemente menor entropia.

Tendo isto em vista, pode-se observar nas Figuras 4.19 e 4.21, partículas 1 e 3 respectivamente, que próximo ao nono nível de decomposição a entropia modificada de Shannon começou a estabilizar-se, assim foi determinado que dez

decomposições seriam o suficiente, sendo que valores maiores não trariam mais informações relevantes.

Já para a partícula 2 a entropia não se estabilizou em um valor mínimo, como pode ser observado na Figura 4.20, de forma que se utilizou doze decomposições, valor máximo disponível no *software* Matlab® quando utilizado o aplicativo *Wavelet Toolbox*®, ou seja, doze.

Figura 4.19: *Wavelet energy Shannon entropy* em função das aproximações para a partícula 1

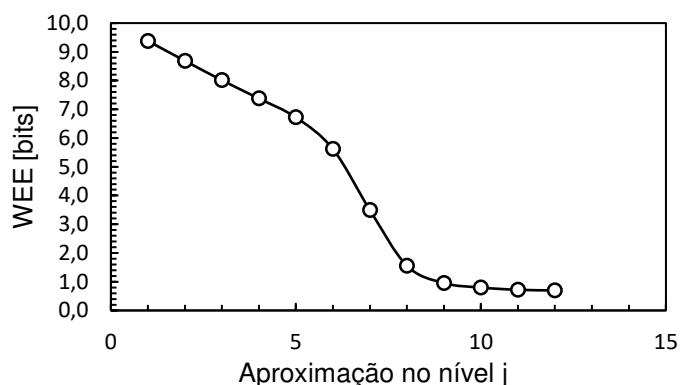


Figura 4.20: *Wavelet energy Shannon entropy* em função das aproximações para a partícula 2

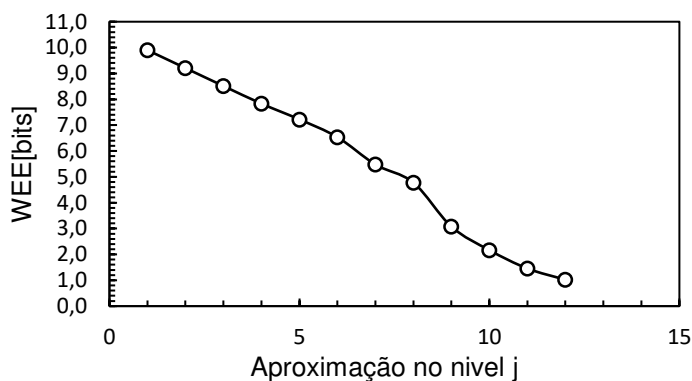
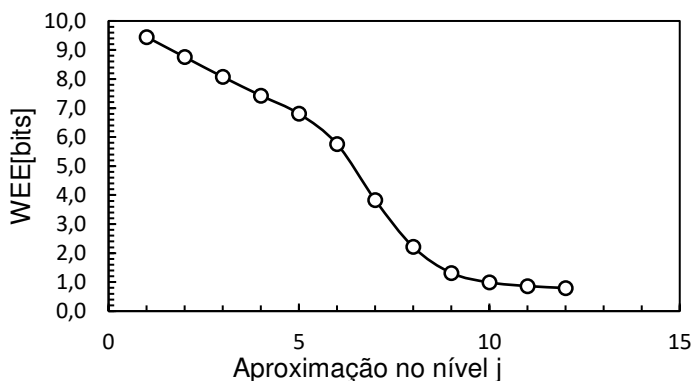


Figura 4.21: *Wavelet energy Shannon entropy* em função das aproximações para a partícula 3



4.8 Análise da distribuição da energia relativa nas decomposições para classificação de regimes

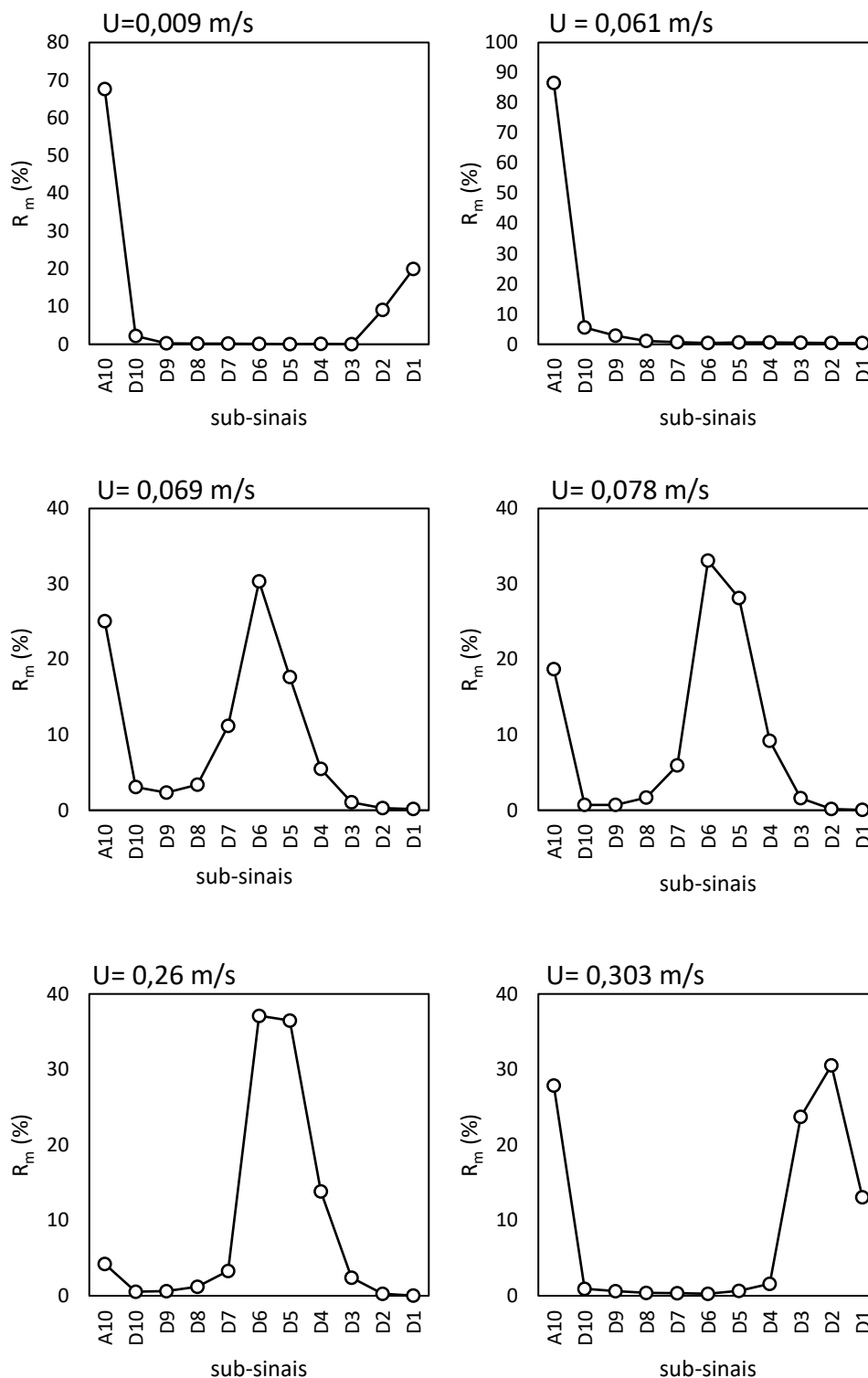
Como descrito por VAN OMMEN *et al.* (2011) e CHEW *et.al.* (2014) as decomposições da *wavelet* analisando a distribuição da energia relativa podem ser utilizadas para avaliar a qualidade da fluidização. Estes autores afirmam que picos de energia, associados a frequências médias são indicativos de boa fluidização, já que estas estão associadas a movimentação das bolhas no leito.

A Figura 4.22 apresenta os resultados para a partícula 1. Pode-se notar que da velocidade inicial de 0,009 m/s até 0,061 m/s a energia da aproximação A10 é predominante. Esta corresponde a frequências baixas (faixa de aproximadamente 0 ~ 0,1 Hz) e podem estar relacionadas à passagem do ar. O pequeno aumento da energia de altas frequências (D1, D2 para $U = 0,009$ m/s) em baixas velocidades provavelmente indicam ruídos no sistema provenientes do soprador, vibração da coluna e dos transdutores, por exemplo. Estes desaparecem com o aumento da vazão de gás (Figura 4.22, $U = 0,061$ m/s). Esses dois casos correspondem ao regime de leito expandido

Quando a velocidade atinge 0,069 m/s pode-se facilmente identificar uma mudança no padrão de distribuição de energia. Neste há a diminuição da energia proveniente da aproximação A10 e o aumento daquela derivada dos detalhes, principalmente de D7, D6 e D5. SILVA (2015) identificou um padrão semelhante em um processo em regime borbulhante e percebeu que a maior parte da energia estava concentrada nos sub-sinais 6 e 7 que em conjunto com os demais sinais formam um perfil de distribuição normal gaussiana. Tal alteração de padrão ajuda a identificar a velocidade de mínima fluidização, que experimentalmente foi de 0,066 m/s, ou seja, está entre a mudança no padrão gráfico de energia de $U = 0,061$ m/s e $U = 0,069$ m/s.

A energia destes detalhes continua aumentando à medida que se aumenta a velocidade de fluidização. No último gráfico da Figura 4.22 ($U = 0,303$ m/s), o pico que vinha se estabelecendo nos detalhes intermediários desaparece, dando espaço para um novo pico na região de altas frequências. Esse novo padrão pode indicar o início do regime turbulento.

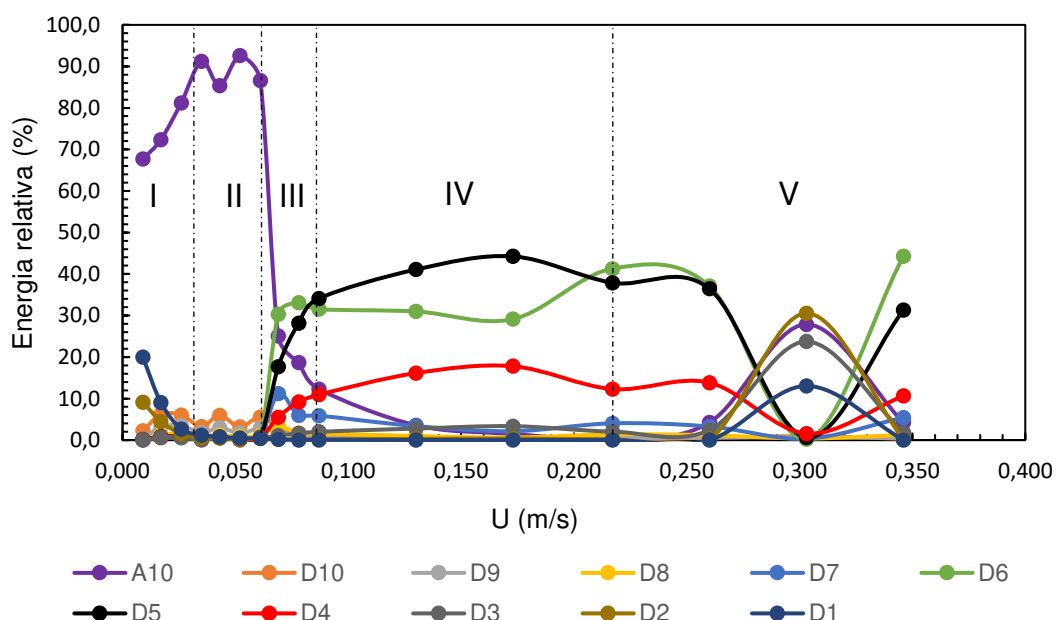
Figura 4.22: Energias relativas para a partícula 1 em função do nível de decomposição



Construindo um gráfico das energias relativas em função da velocidade superficial do gás (Figura 4.23) como proposto por JIANG *et al.* (2012) e apresentando os perfis dos diferentes detalhes (D1 a D10) e aproximação (A10), pode-se estabelecer uma metodologia para a identificação de regimes de fluidização

a partir da análise *wavelet*. As regiões definidas nas Figuras 4.23, por exemplo, foram estabelecidas ao buscar padrões no comportamento dos sub-sinais como na região I em que há crescimento aproximadamente linear do sub-sinal A10 ou ainda quando existiram inversões dos sub-sinais predominantes como na região IV delimitada pelas inversões de D5 e D6. As regiões determinadas foram comparadas com os resultados obtidos por CASTILHO *et al.* (2011), apresentados na Tabela 4.4, que utilizaram a mesma série de dados, mas aplicando as análises de Fourier e caos.

Figura 4.23: Energia relativa da partícula 1 em função da velocidade



As regiões I e II na Figura 4.23 correspondem ao leito expandido. Estas são caracterizadas pela alta energia de A10 e praticamente ausência dos outros sub-sinais. A região I pode ser relacionada com a predominância de ruídos no sistema visto que há maior energia de frequências altas (D1 e D2), não características da fluidização e a aproximação A10 que ainda está crescente, esta por sua vez é característica de leitos fixos/expandidos uma vez que sua baixa frequência (0 ~ 0,0975 Hz) pode ser relacionada a pequenos choques de partícula e passagem do ar. Além disso o sub-sinal A10 é valioso para determinação do colapso do leito de acordo com SILVA (2015). Já para a região II, a aproximação A10 já se mostra mais estável e pode-se observar que o detalhe de mais baixa frequência (D10) é superior aos demais. Isso vai de encontro com SILVA (2015), que verificou a

presença de maior energia no sub-nível 10 quando seu processo estava interrompido, ou seja, em condição de leito expandido.

Com a queda da energia de A10 e aumento de D4 (6,25 ~ 12,5 Hz), D5 (3,125 ~ 6,25 Hz) e D6 (1,56 ~ 3,125 Hz) observa-se o início da fluidização, é importante ressaltar que estes sub-sinais (D4, D5 e D6) encontram-se dentro da faixa de frequência dos fenômenos característicos de um leito fluidizado. A região III identifica uma região de transição que engloba a condição de mínima fluidização, caracterizada pelo aumento da energia dos detalhes, ou seja, as informações a respeito da fluidodinâmica do leito que eram provenientes das baixas frequências características do leito expandido estão passando para faixas de frequências mais elevadas presentes, agora, nos detalhes principalmente D4, D5 e D6. Este fato está relacionado à mesoescala que fisicamente corresponde ao aumento do borbulhamento no leito. Na região IV há o nivelamento da energia de D5 e D6, estabelecendo o regime iniciado na região anterior. Comparando com os resultados observados por CASTILHO *et al* (2011), a região III coincide com a de explosão de bolhas.

Tabela 4.4: Observações experimentais dos regimes obtidas por Castilho *et.al.* (2011) para as mesmas séries temporais

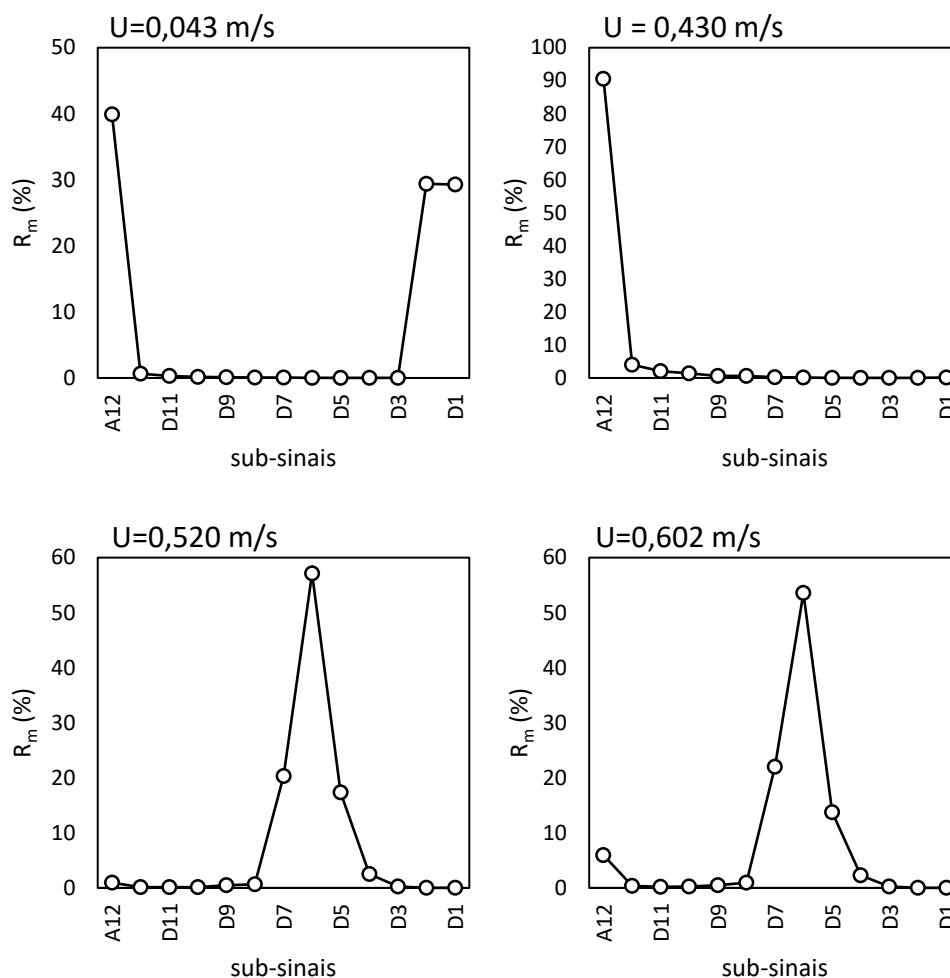
Partícula 1		Partícula 2		Partícula 3	
U [m/s]	Condição	U [m/s]	Condição	U [m/s]	Condição
0,061	Leito expandido	0,043	Leito expandido	0,017	Leito expandido
0,069	Explosão de bolhas	0,217	Leito expandido	0,052	Bolhas múltiplas
0,078	Explosão de bolhas	0,390	Movimento de partículas	0,061	Bolhas múltiplas
0,087	Explosão de bolhas	0,433	Movimento de partículas	0,069	Bolhas múltiplas
0,150	<i>Slugging</i>	0,520	<i>Slugging</i>	0,078	Explosão de bolhas
0,346	<i>Slugging</i>	0,606	Explosão de bolhas	0,087	Explosão de bolhas

Por outro lado, a região IV vista como continuidade do regime estabelecido foi definida, a partir de $U = 0,150$ m/s como início do regime de *slugging* por CASTILHO *et al.* (2011). Alguma alteração que pudesse indicar mudança no regime fluidodinâmico só foi identificada com o aumento da velocidade ponto em que a velocidade é 0,217 m/s há inversão da energia predominante, D6 passa a ser maior que D5, fato que só ocorreu na região de transição III. Assim a região V poderia ser um indicativo de *slugging*, apresentando as seguintes características: energia da aproximação A10 é quase nula; energias dos detalhes D5 e D6 elevadas; e energia relativa do detalhe D6 maior que a do detalhe D5, o que indica uma leve alteração na banda de frequência dominante, que passa a ocorrer entre 1,56 a 3,13 Hz (correspondente ao sexto detalhe). Na região 5, entretanto, também pode-se observar que em $U = 0,303$ m/s há uma mudança brusca na distribuição de energia. A dominância passa a ser dos detalhes D1, D2 e D3. Castilho *et al.*(2011) não observou nenhuma ocorrência neste ponto, entretanto essa instabilidade poderia ser indicativo de um regime turbulento já que estas frequências maiores poderiam ser relacionadas a passagem do ar e não mais a presença de bolhas.

A partícula 2, pertence à classificação D de Geldart, exhibe comportamento de difícil fluidização, conforme discutido nas seções 4.2 e 4.3. O comportamento do leito expandido é bastante semelhante ao encontrado para o caso anterior. Neste há baixa energia em todos os detalhes e predomínio da aproximação. Este comportamento permanece até $U = 0,43$ m/s (Figura 4.24).

A mínima fluidização é identificada em $U = 0,52$ m/s, a qual está de acordo com a U_{mf} experimental. O próximo ponto confirma a fluidização do leito, mas não é possível afirmar que existam diferentes regimes de fluidização entre os dois últimos pontos aferidos. No caso do trabalho de CASTILHO *et al.* (2011), os autores observaram que o leito encontrava-se em regime de *slugging* para $U = 0,520$ m/s e de explosão de bolhas para $U = 0,602$ m/s. É interessante notar que o leito com partículas do tipo D gerou picos mais estreitos (Figura 4.24) com a energia de D6 (1,56 ~ 3,125 Hz) muito superior as outras.

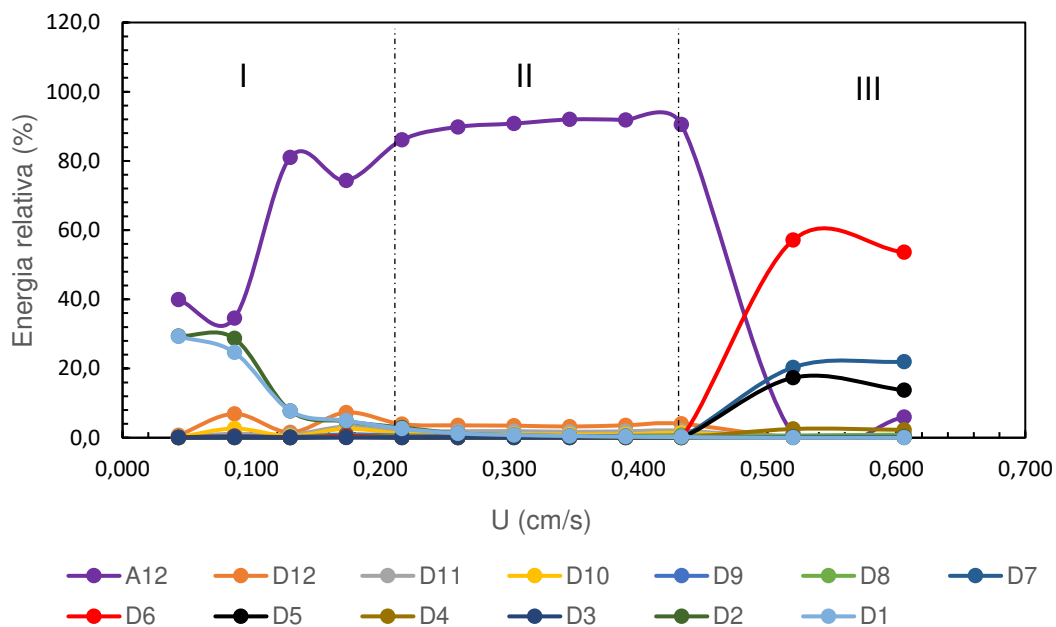
Figura 4.24: Energia relativa da partícula 2 em relação ao nível de decomposição



O gráfico de energia relativa em função da velocidade superficial de gás, Figura 4.25, foi construído para avaliar os perfis dos diferentes detalhes e da aproximação para os ensaios de fluidização com a partícula 2. Foi possível distinguir três regiões. A primeira em que a aproximação A12 é crescente e os detalhes de alta frequência (D1 e D2) decrescentes correspondem a região de leito expandido conforme o reportado por CASTILHO *et al.* (2011). Quando a velocidade atinge 0,217 m/s os autores observaram uma região de transição onde há movimento das partículas, mas não há fluidização propriamente dita. Na Figura 4.25 esse fato é coerente com a região II em que A12 se estabiliza e a baixa frequência predominante pode ser relacionada a esta movimentação inicial das partículas e ausência de bolhas. O início do *slugging* próximo a velocidade de 0,520 m/s pode ser comparado com a região III em que há queda abrupta da aproximação A12 e aumento da energia relativa aos detalhes D5, D6 e D7. CASTILHO *et al.* (2011) ainda verifica que na velocidade de 0,606 m/s o regime de explosão de bolhas. No caso da *wavelet* é difícil afirmar uma quarta região, pois neste ponto pode-se observar

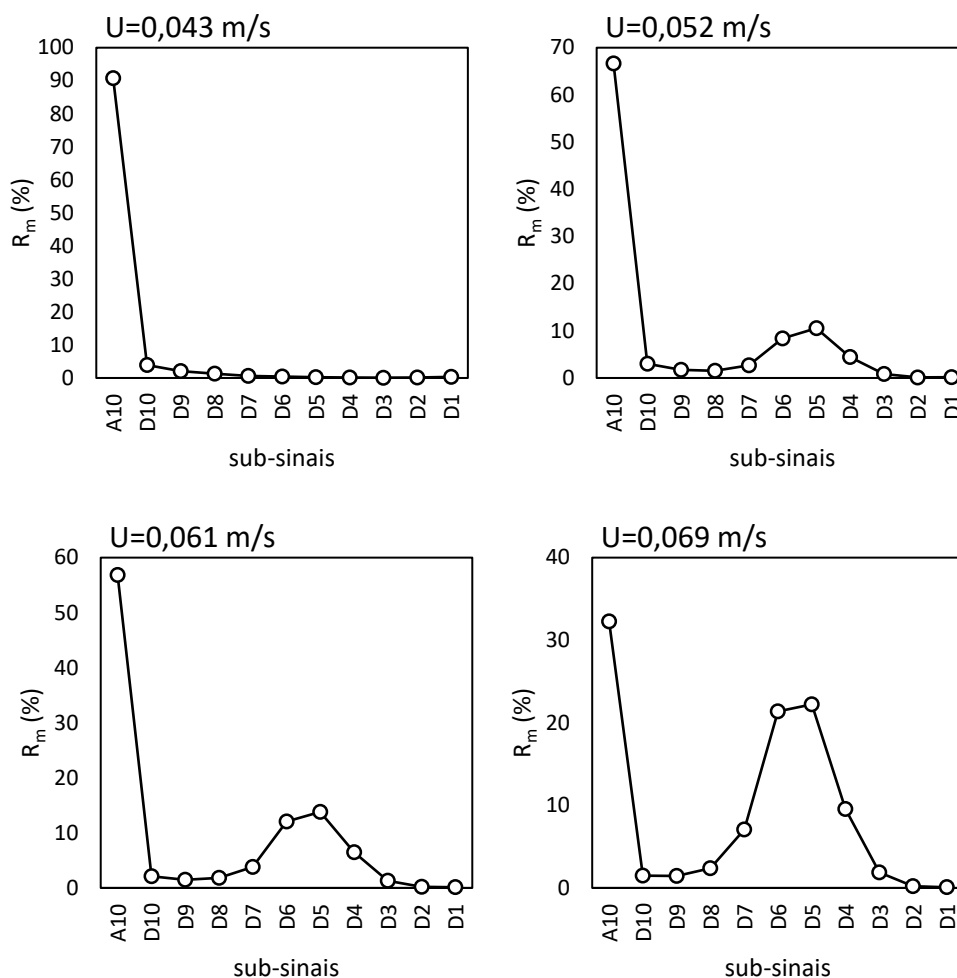
apenas uma sutil diminuição das energias predominantes com aumento da aproximação A12.

Figura 4.25: Energia relativa da partícula 2 em relação a velocidade



Apesar de as partículas 1 e 3 pertencerem à mesma classificação de Geldart (Grupo B), apresentando massas específicas e diâmetros de Sauter semelhantes, elas exibem comportamentos distintos. A partícula 3 apresentou distribuição de energia semelhante para a condição de leito expandido, ou seja, com a aproximação A10 presente e ausência das demais. Por outro lado, a fluidização não se iniciou com um pico de energia definido nos detalhes D5 e D6, mas sim com uma discreta elevação do nível de energia nesses detalhes para a condição de $U=0,052$ m/s. Conforme a velocidade superficial do gás se elevou, o pico de energia nos detalhes intermediários foi definindo-se cada vez mais (Figura 4.26).

Figura 4.26: Energia relativa da partícula 3 em função do nível de decomposição

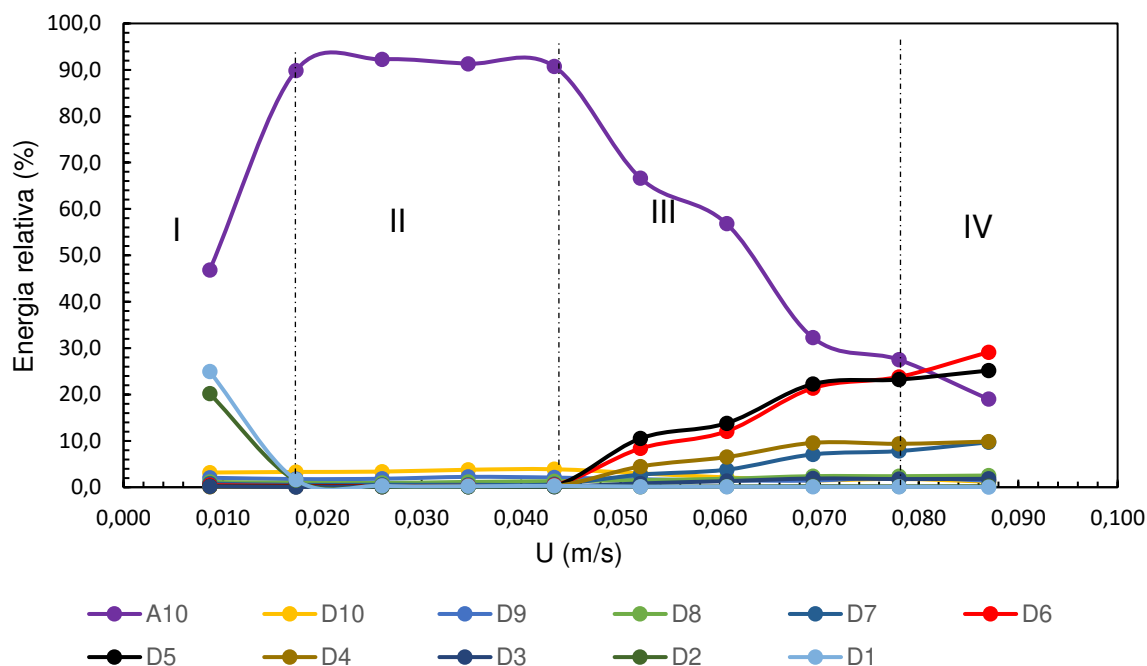


A partir da Figura 4.27, que apresenta os perfis de energia relativa em função da velocidade para os diferentes detalhes e a aproximação para os ensaios de fluidização da partícula 3, pode-se identificar quatro regiões distintas. As duas primeiras dizem respeito ao leito expandido. Em que, como no caso das partículas anteriores a primeira região é sinalizada pela presença do ruído do sistema devido à passagem do ar e a segunda pela estabilização e predominância da energia correspondente às frequências mais baixas (aproximação A10). Comparando os casos da partícula 3 com a partícula 1, também é possível notar que o material particulado 3 não apresentou uma região de transição seguida de um patamar em que as energias se estabilizaram. Assim a região III, caracterizada como regime de bolhas múltiplas por CASTILHO *et al.* (2011), foi definida como aquela em que a energia D5 é superior à de D6 e que a aproximação A10 é maior que ambas. É importante salientar que se nota uma maior distribuição das energias no regime de bolhas múltiplas se comparado ao regime de fluidização borbulhante da partícula 1. Nas Figuras 4.26 e 4.27 é possível observar a contribuição dos detalhes D4, D5, D6

e D7, ou seja, há uma banda mais larga de frequências partindo de 0,78 Hz (D7) até 12,5 Hz (D4). Este fato vai de encontro com a análise espectral de Fourier que apresenta um espectro de base mais larga para este regime.

CASTILHO *et al.* (2011) determinaram que na velocidade de 0,078 m/s o regime passou de bolhas múltiplas para explosão de bolhas. Este ponto é o primeiro em que a energia de D6 é maior que D5. Entretanto, na velocidade de 0,087 m/s há uma diferença mais clara entre os detalhes caracterizando uma quarta região. Por outro lado esta mudança é muito sutil e seriam necessários mais dados e aplicar ensaios para mais velocidades para afirmar que esta inversão de energia poderia ser característica da passagem de um regime de bolhas múltiplas para o de explosão de bolhas.

Figura 4.27: Energia relativa da partícula 3 em função da velocidade



Essa diferença observada entre as esferas de vidro (material particulado 1) e a areia (material particulado 3) pode ser explicada pela distribuição dos diâmetros de partícula, cujos histogramas encontram-se no anexo A. Apesar do diâmetro de Sauter ser semelhante para ambos (Tabela 3.1), a areia apresenta uma concentração maior de partículas com diâmetros menores enquanto as esferas de vidro exibem uma distribuição mais concentrada em um único diâmetro. Este motivo também justifica o início da fluidização com velocidade superficial de gás menor para partículas de areia em relação às esferas de vidro.

Capítulo 5 - Conclusões e Sugestões

Nesta Dissertação estudou-se a fluidização gás-sólido a partir de resultados experimentais adquiridos por Castilho *et al.* (2011), que utilizaram partículas do grupo B e D da classificação de Geldart como fase particulada e ar como fase gasosa. As séries temporais analisadas referem-se às medidas de pressão que foram realizadas variando decrescentemente a velocidade superficial de ar. Tais séries foram analisadas a partir de técnicas clássicas como médias temporais e desvio padrão e também pela técnica *wavelet*, por meio de perfis de distribuição de energia que possibilitou a caracterização dos regimes de fluidização.

A análise clássica no domínio do tempo possibilitou a obtenção da velocidade de mínima fluidização a partir da curva de fluidização. Estes resultados foram comparados com a mínima fluidização teórica obtida pela equação de Ergun que resultaram em desvios menores que 15%. Por outro lado, a determinação pelo desvio padrão trouxe velocidades bastante abaixo das anteriores, em regiões que o leito ainda se encontrava expandido.

Quanto à escolha da família *wavelet*, o critério usado foi a capacidade de reconstrução do sinal com a menor perda de informação. Foram avaliadas *wavelets* da família Daubechie e Meyer sendo que a Daubechie de segunda ordem apresentou os menores erros quando avaliada em função da velocidade e manteve o erro aproximadamente constante quando variou-se o nível de decomposição diferente das outras que apresentaram aumento linear do erro até a sexta decomposição para só então encontrar estabilidade.

Para determinar o nível de composição ótimo, calculou-se a WEE (*Wavelet Energy Shannon Entropy*). Para os materiais particulados 1 e 3, esferas de vidro e areia, respectivamente, obteve-se um valor mínimo para 10 níveis de decomposição, enquanto para a partícula 2 não se observou um valor mínimo de entropia. Sendo assim, foram utilizados 12 níveis.

A distribuição de energia mostrou-se eficiente para diferenciar a região de leito expandido do início da fluidização, visto que este é marcado por um pico de energia nos sub-sinais centrais da distribuição. Estes fatos concordaram com a análise no domínio do tempo, assim como a velocidade de mínima fluidização teórica. Quanto a identificação de regimes fluidodinâmicos, a *wavelet* demonstrou-se

capaz de apontar ocorrências em pontos análogos aqueles identificados por outras técnicas. Em geral houve dificuldade em visualizar um indicativo da transição para o regime de *slugging* na partícula 1 e na explosão de bolhas na partícula 2, uma vez que as variações de energia foram sutis e a interpretação pode ser subjetiva.

A conclusão geral desta Dissertação de Mestrado é que a transformada *wavelet* apresenta-se como uma técnica aplicável na análise de sinais de pressão em leitos fluidizados. A técnica se mostrou eficaz na determinação da velocidade de mínima fluidização e na identificação de ocorrências em pontos que identificam transições de regimes fluidodinâmicos. Por outro lado, é importante ressaltar que se a necessidade está apenas em encontrar o parâmetro de velocidade de mínima fluidização, sugere-se utilizar as técnicas clássicas de análises no domínio do tempo, como a construção da curva de fluidização a partir de valores médios das séries temporais, pois estas fornecem resultados com mais agilidade, porém com menor precisão do que é fornecida pela transformada *wavelet*.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Algumas sugestões para trabalhos futuros são listadas a seguir:

- Estudo da fluidização com partículas de classificações e distribuições granulométricas diferentes;
- Utilizar a transformada *wavelet*, principalmente em termos de distribuição de energias, com auxílio visual dos fenômenos que estão ocorrendo no leito de forma a tentar estabelecer padrões (ensaios experimentais).
- Utilizar a os diversos resultados obtidos pela técnica de decomposição da *wavelet* juntamente com parâmetros resultantes de outras técnicas de análise (por exemplo, os expoentes de Hurst como citados na revisão bibliográfica desta dissertação ou ainda a *Packet Wavelet Transform*).

Capítulo 6 - Referências Bibliográficas

ADDISON, P. S. *The illustrated wavelet transform handbook Introductory theory and applications in science, engineering, medicine and finance*. Edinburgh: IOP, 2002.

ANDRES, D.; ORDOÑEZ, R. *Estudo experimental de de flutuações de pressão em leito fluidizado gás-sólido de flutuações de pressão em leito fluidizado gás-sólido*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, 2014. 379 p. Dissertação (Mestrado)

BI, H. A critical review of the complex pressure fluctuation phenomenon in gas-solid fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, v. 62, p. 3473–3493, 2007.

BOGGESS, A.; NARCOWICH, F. J. *A first course in wavelets with Fourier analysis*. 1st ed. California: Prentice Hall, 2001.

CASTILHO, G. J. *Determinação experimental das distribuições radial e axial de concentração de sólidos em uma seção riser utilizando sonda de fibras ópticas*. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, Unicamp, 2007. 119 p. Dissertação (Mestrado)

CASTILHO, G. J. *Análise de caos em leito fluidizado circulante*. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, Unicamp, 2011. 183 p. Tese (Doutorado)

CASTILHO, G. J.; CREMASCO, M. A.; MARTÍN L.; ARAGÓN J. M. Experimental fluid dynamics study in a fluidized bed by deterministic chaos analysis. *Particulate Science and Technology*, v. 29, n. 2, p. 179–196, 2011.

CASTILHO, G. J.; BRAGA, N. P.; CREMASCO, M. A. *Técnicas de medidas para o estudo da fluidodinâmica em sistemas particulados: estado da arte*, Anais do XXXII Congresso Brasileiro em Sistemas Particulados, Maringá, 2006

CHAPLIN, G.; PUGSLEY, T. Application of electrical capacitance tomography to the fluidized bed drying of pharmaceutical granule. *Chemical Engineering Science*, v. 60, n. 24, p. 7022–7033, 2005.

MEMC ELECTRONIC MATERIALS S.A, St. Peters, CHEW, J. W.; BHUSARAPU, S.; WEATHERFORD, K. E. *Using wavelet decomposition to determine the fluidization quality in a fluidized bed reactor*. US 2014/0112831 A1, Apr. 2014.

CLARK, N. N.; MCKENZIE, E. A.; GAUTAM, M. Differential pressure measurements in a slugging fluidized bed. *Powder Technology*, v. 67, n. 2, p. 187–199, 1991.

COSTA, K. *Calibração de Sondas de Fibra óptica para medir Fração Volumétrica em Leito Fluidizado*. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, Unicamp, 2016. Iniciação Científica (Graduando em Engenharia Química)

CREMASCO, M. A. *Operações Unitárias em Sistemas Particulados e fluidomecânicos*. São Paulo: Blucher, 2012.

CUTOLO, A, RENDINA I, ARENA U, MARZOCHELL A, MASSIMILLA L. Optoelectronic technique for the characterization of high concentration gas-solid suspension. *Applied optics*, v. 29, n. 9, p. 1317–1322, 1990.

DEBNATH, L. Wavelet transforms and their applications. *Proceedings of the Indian National Science Academy*, v. 6, p. 685 – 713, 1998.

DUBRAWSKI K, TEBIANIAN S, BI H, CHAOUKI J, ELLIS N, GERSPACHER R, JAFARI R, KANTZAS A, LIM C, PATIENCE G, PUGSLEY T QI M, ZHU J, GRACE J,. Traveling column for comparison of invasive and non-invasive fluidization voidage measurement techniques. *Powder Technology*, v. 235, p. 203 - 220, 2013.

ELLIS N, BRIENS L, GRACE J, BI H, LIM C,.. Characterization of dynamic behaviour in gas-solid turbulent fluidized bed using chaos and wavelet analyses. *Chemical Engineering Journal*, v. 96, p. 105 – 116, 2003.

ELLIS, N, BI H, LIM C, GRACE J, Influence of probe scale and analysis method on measured hydrodynamic properties of gas-fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, v. 59, p. 1841–1851, 2004.

FAUST, O, ACHRYA U, ADELI H, ADELI A, Wavelet-based EEG processing for computer-aided seizure detection and epilepsy diagnosis. *Seizure*, v. 26, p. 56–64, 2015.

FELIPE, C. A. S.; ROCHA, S. C. S. Time series analysis of pressure fluctuation in gas-solid fluidized beds. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 21, n. 3, p. 497 – 507, 2004.

FELIPE, C. A. S.; ROCHA, S. C. S. Prediction of minimum fluidization velocity of gas-solid fluidized beds by pressure fluctuation measurements - Analysis of the standard

deviation methodology. *Powder Technology*, v. 174, p. 104 – 113, 2007.

GAO, R. X.; YAN, R. *Wavelets: Theory and Applications for Manufacturing*, Springer, 2011. Cap. II: From Fourier transform to wavelet transform: A historical perspective. p. 17 - 32

GELDART, D. Types of gas fluidization. *Powder Technology*, v. 7, n. 5, p. 285–292, 1973.

GENG, Q, ZHU X, YANG J, YOU X, LIU Y, LI C,. Flow regime identification in a novel circulating-turbulent fluidized bed. *Chemical Engineering Journal*, v. 244, p. 493–504, 2014.

GUPTA, C. K.; SATHIYAMOORTHY, D. *Fluid Bed Technology in Materials Processing*. CRC Press, 1999.

HOWARD, J. R. *Fluidized Bed Thechnology*. Bristol: Adam Hilger, 1989.

JIANG, H, CHEN H, WANG Y, WU Z, GAO J, YANG X, *Wavelet Based Analysis of Pressure Fluctuation Signals Measured from A Wind Cap in Bubbling Fluidized Bed*. Proceedings of International conference on mechatronics and automation. Chengdu, China, 2012. p. 1434–1438

JOHNSSON, F, ZJERVELD R, SCHOUTEN J, BLEEK C, LECKNER B,. Characterization of fuidization regimes by time-series analysis of pressure fluctuations. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 26, p. 663–715, 2000.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. *Fluidization Engineering*. 2nd. ed. Butterworth-Heinemann, 1991.

LI, H. Application of wavelet multi-resolution analysis to pressure fluctuations of gas–solid two-phase flow in a horizontal pipe. *Powder Technology*, v. 125, p. 61–73, 2002.

LI, J, WEN L, GE W, CUI H, REN J. Dissipative structure in concurrent-up gas-solid flow. *Chemical Engineering Science*, v. 53, n. 19, p. 3367–3379, 1998.

LI, J. Compromise and resolution - Exploring the multi-scale nature of gas-solid fluidization. *Powder Technology*, v. 111, p. 50–59, 2000.

LI, Y, GRACE J, GOPALUNI R, BI H, LIM C, ELLIS N,. Characterization of gas-solid

fluidization: A comparative study of acoustic and pressure signals. *Powder Technology*, v. 214, p. 200–210, 2011.

LU, X.; LI, H. Wavelet analysis of pressure fluctuation signals in a bubbling fluidized bed. *Chemical Engineering Journal*, v. 75, p. 113–119, 1999.

MATHURANATHAN, V. *Power and Energy of a signal*. Disponível em: <<https://www.gaussianwaves.com/2013/12/power-and-energy-of-a-signal/>>.

MATSUNO, Y, YAMAGUCHI H, OKA T, KAGE H, HIGASHITANI K,. The use of optic fiber probes for the measurement of dilute particle concentrations: calibration and application to gas-fluidized bed carryover. *Powder Technology*, v. 36, p. 215–221, 1983.

MISITI, M. *Wavelet Toolbox for use with MATLAB*. MathWorks, 1996, 626 p.

MUDDE, R. F. Time-resolved X-ray tomography of a fluidized bed. *Powder Technology*, v. 199, p. 55–59, 2010.

NITZ, M.; GUARDANI, R. Fluidização Gás-Sólido – Fundamentos e Avanços. *Revista Brasileira de Engenharia Química*, 2008.

OLIVEIRA, J. *Desenvolvimento De Um Sensor De Temperatura Inteligente : Compensação Em Tempo Real Dos Efeitos De Convecção, Acumulação E Radiação*. São Carlos: Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, 2006. 97 p. Tese (Doutorado)

PARISE, M. R. *Aplicação da distribuição espectral normal em leito fluidizado gás-sólido*. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, Unicamp, 2007. 131 p. Tese (Doutorado)

PENHA, R. M. L. *Análise de sinais em regime transiente aplicando a técnica de wavelet*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, 1999. 95 p. Dissertação (Mestrado)

PRIETO, W. H. *Aplicação da teoria do caos em um leito fluidizado utilizando-se partículas a, b e d da classificação Geldart*. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, Unicamp, 2014. 127 p. Dissertação (Mestrado)

PRIETO, W. H.; CREMASCO, M. A. *Emprego da análise de caos na caracterização*

de regimes fluidizados para partículas do grupo A da classificação de Geldart. Anais do XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, São Carlos, 2015

PROAKIS, J. G.; MANOLAKIS, D. G. *Digital signal processing: Principles, Algorithms, and applications*. 3 ed. New Jersey: Prentice Hall, 1996.

SAHOO, S, KANUNGO B, BEHERA S, SABUT S, Multiresolution wavelet transform based feature extraction and ECG classification to detect cardiac abnormalities. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v. 108, p. 55–66, 2017.

SASIC, S.; LECKNER, B.; JOHNSON, F. Time-frequency investigation of different modes of bubble flow in a gas-solid fluidized bed. *Chemical Engineering Journal*, v. 121, n. 1, p. 27–35, 2006.

SASIC, S.; LECKNER, B.; JOHNSON, F. Characterization of fluid dynamics of fluidized beds by analysis of pressure fluctuations. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 33, n. 5, p. 453–496, 2007.

SAVOLAINEN, K.; KARVINEN, R. *Particle Mixing in Gas-Solid Bubbling Bed*. Finland: Tampere University of Technology, 11 p. 2008.

SCATENA, R, MOURA V, PRIETO W, NUNHEZ J, CREMASCO M,. *Spectral analysis applied to time series from a fluidized bed CFD model*. Anais do XXXVIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Maringá, 2017.

SCATENA, R. *Análise do caos em flutuações de pressão oriundas de modelagem CFD na condição de mínima fluidização em leito fluidizado*. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, Unicamp, 2018. 125 p. Dissertação (Mestrado)

SILVA, C. A. *Aplicação de Tecnologias Analíticas de Processo e Inteligência Artificial para Monitoramento e Controle de Processo de Recobrimento de Partículas em Leito Fluidizado*. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, Unicamp, 2015. 325 p. Tese (Doutorado)

STRINGER, J. *Is a fluidized bed a chaotic dynamic system?*, Proceedings of the 10th International conference on fluidized bed combustion, San Francisco, CA, v.1, pp.265-272, 1989.

SUTHERLAND, J. P. The measurement of pressure drop across a gas fluidized bed.

Chemical Engineering Science, v. 19, p. 839–841, 1964.

TAHMASEBPOUR, M.; ZARGHAMI, R.; MOSTOUFI, N. Particuology Characterization of various structures in gas-solid fluidized beds by recurrence quantification analysis. *Particuology*, v. 11, p. 647–656, 2013.

TAMADONDAR, M. R, ZARGHAMI R, TAHMASEBPOOR M, MOSTOUFI N, Characterization of the bubbling fluidization of nanoparticles. *Particuology*, v. 16, p. 75–83, 2014.

TANNOUS, K.; HEMATI, M.; LAGUERIE, C. Caractéristiques au minimum de fluidisation et expansion des couches fluidisées de particules de la catégorie D de Geldart. *Powder Technology*, v. 80, p. 55–72, 1994.

TEBIANIAN, S. *Comparison of alternative advanced experimental techniques for measurement of hydrodynamic characteristics of gas- fluidized beds*. Federico: University of Naples, 2015. 246 p. Tese (Doutorado)

TEBIANIAN, S, DUBRAWSKI K, ELLIS N, COCCO R, HAYS R, REDDY S, LEADBEATER T, PARKER D, CHAOUKI J, JAFARI R, GARCIA P, SERVILLE J, GRACE J,. Comparison of particle velocity measurement techniques in a fluidized bed operating in the square-nosed slugging flow regime. *Powder Technology*, v. 296, p. 45–52, 2016.

THOBER, C. W. A. *Fluidodinâmica do leito fluidizado circulante para partículas do grupo B*. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, Unicamp, 1995. 189 p. Tese (Doutorado)

TRUCHETET, F.; LALIGANT, O. Wavelets in industrial applications: a review. in Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, v.5607, 14 p. 2004.

DOGRA, A. GOYAL, B. AGRAWAL, S. Performance Comparison of Different Wavelet Families Based on Bone Vessel Fusion. *Asian Journal of Pharmaceutics*, v. 10, n. 4, p. 791–795, 2012.

VAN DEN BLEEK, C. M.; SCHOUTEN, J. C. Deterministic chaos: a new tool in fluidized bed design and operation. *The Chemical Engineering Journal and The Biochemical Engineering Journal*, v. 53, n. 1, p. 75–87, 1993.

VAN OMMEN, J. R, SASIC S, VAN DER SCHAAF J, GHEORGHIU S, JOHNSON F, COPPENS M, Time-series analysis of pressure fluctuations in gas-solid fluidized beds - A review. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 37, n. 5, p. 403–428, 2011.

VAN OMMEN, J. R.; MUDDE, R. F. Measuring the Gas-Solids Distribution in Fluidized Beds -- A Review. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, v. 6, 2008.

VARAKSIN, A. Y. Laser Doppler Anemometry of “ Gas–Solid Particles ” Heterogeneous Flows : Problems , Advances , Prospects. *High temperature* v. 41, n. 5, p. 657–664, 2003.

WERTHER, J. Measurement techniques in fluidized beds. *Powder Technology*, v. 102, p. 15–36, 1999.

WIESENDORF, V.; WERTHER, J. Capacitance probes for solids volume concentration and velocity measurements in industrial fluidized bed reactors. *Powder Technology*, v. 110, p. 143–157, 2000.

XU, G, LIANG C, CHEN X, LIU D, XU P, SHEN L, ZHAO C,. *et al.* Investigation on dynamic calibration for an optical-fiber solids concentration probe in gas-solid two-phase flows. *Sensors*, v. 13, p. 9201-9222, 2013.

YANG. *Handbook of Fluidization and Fluid-Particles Systems*. Pittsburgh: SWPC, 2003.

YANG, Q.; WANG, J. Multi-Level Wavelet Shannon Entropy-Based Method for Single-Sensor Fault Location. *Entropy*, v.17, p. 7101–7117, 2015.

YANG, T. Y.; LEU, L. P. Multi-resolution analysis of wavelet transform on pressure fluctuations in an L-valve. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 34, n. 6, p. 567–579, 2008.

YURONG, H, HULLIN L, QIAOQUN S, LIDAN Y, YUNHUA Z, GIDASPOW D, BOUILLARD J,. Hydrodynamics of gas-solid flow around immersed tubes in bubbling fluidized beds. *Powder Technology*, v. 145, p. 88–105, 2004.

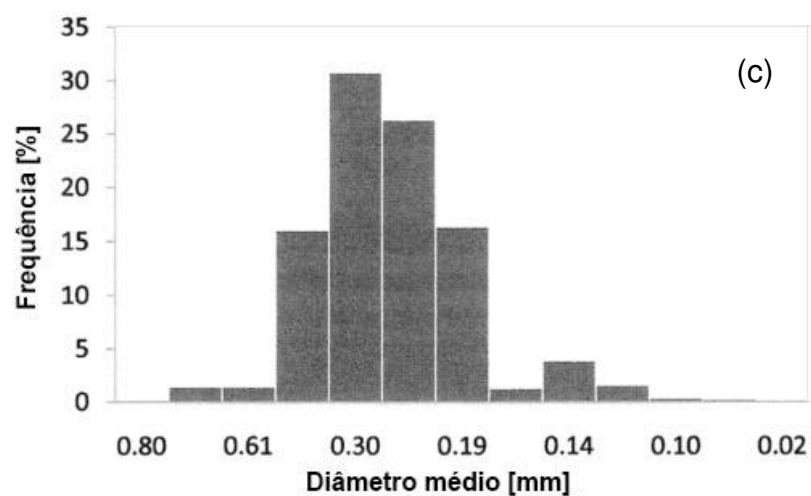
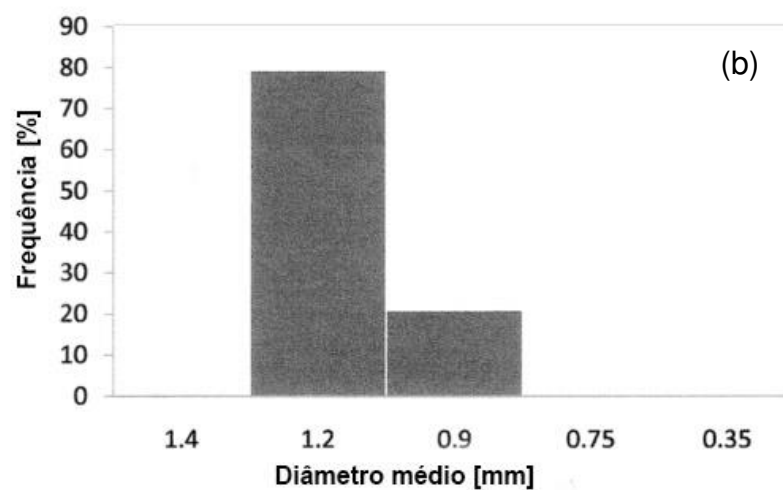
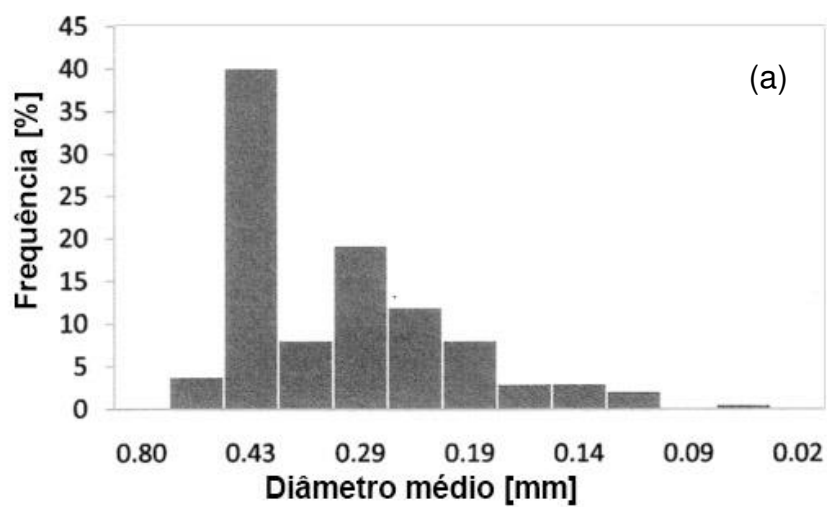
ZHAO, G.; YANG, Y. Multiscale Resolution of Fluidized-Bed Pressure Fluctuations. *American Institute of Chemical Engineers Journal*, v. 49, n. 4, p. 869–882, 2003.

ZHENGYOU, H, SHIBIN G, XIAOQUIN C, JUN Z, ZHIQUIAN B, QUIGQUAN Q,. Study of a new method for power system transients classification based on wavelet entropy and neural network. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v. 33, n. 3, p. 402–410, 2011.

Anexo A

Histogramas para caracterização do material particulado

Figura A 1: Histogramas da distribuição de partículas (a) Partícula 1, (b) Partícula 2, (c) Partícula 3



Fonte: Adaptado de (CASTILHO *et al.*, 2011)