

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**ENGENHARIA QUÍMICA**

**KARIANE DONATTI KACHINSKI**  
**RHAIANNY MALUCELLI STAHLSCHMIDT**

**SELEÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE LEITO DE**  
**JORRO COM FENDA PARA APLICAÇÃO DE SECAGEM**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA**

**2018**

**KARIANE DONATTI KACHINSKI  
RHAIANNY MALUCELLI STAHLSCHMIDT**

**SELEÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE LEITO DE  
JORRO COM FENDA PARA APLICAÇÃO DE SECAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química, do Departamento de Engenharia Química, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Regina Parise

**PONTA GROSSA**

**2018**



---

**TERMO DE APROVAÇÃO**

Seleção E Dimensionamento De Um Sistema De Leito De Jorro Com Fenda Para Aplicação De Secagem

por

Kariane Donatti Kachinski

Rhaianny Malucelli Stahlschmidt

Monografia apresentada no dia 23 de novembro de 2018 ao Curso de Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Everton Moraes Matos  
(UTFPR)

---

M<sup>a</sup>. Flavia Tramontin Silveira Schaffka

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Regina Parise  
(UTFPR)  
Orientador

---

Profa. Dra. Juliana de Paula Martins  
Responsável pelo TCC do Curso de Engenharia Química

## **AGRADECIMENTOS**

Muitas pessoas fizeram parte da nossa caminhada até aqui e todas elas são de fundamental importância em nossas vidas e merecedoras da nossa eterna gratidão. Porém, não podemos deixar de fazer um agradecimento especial a aqueles que estiveram sempre juntos, em cada passo, na construção desse trabalho.

Agradecemos primeiramente a Deus por ter guiado nossos passos até aqui.

Aos nossos pais e familiares que são os responsáveis por termos chegado aonde estamos e nos proporcionaram todo o suporte necessário, pois sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

À nossa orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Regina Parise, pela sabedoria, paciência e dedicação com que nos guiou nessa trajetória.

Aos nossos colegas de sala e amigos.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

“Cada dia que amanhece assemelha-se a uma página em branco, na qual gravamos os nossos pensamentos, ações e atitudes. Na essência, cada dia é a preparação de nosso próprio amanhã. ”

(Chico Xavier)

## RESUMO

KACHINSKI, K. D.; STAHLSCHMIDT, R. M. **Seleção e dimensionamento de um sistema de leito de jorro com fenda para aplicação de secagem**. 2018. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

O leito de jorro retangular surge como uma possível solução para as limitações que são encontradas na geometria tradicional cilíndrica, que são dificuldade em realizar *scale-up* e eficiência reduzida. Por meio de revisões bibliográficas pode-se constatar que a utilização de leitos de jorro de geometria cilíndrica é o mais utilizado no Brasil. No entanto, internacionalmente, a geometria retangular vem sendo estudada e também aplicada. O leito de jorro é utilizado principalmente para secagem, mas também pode ser aplicado na indústria alimentícia, farmacêutica, entre outras. Este trabalho teve como principal finalidade selecionar um sistema de leito de jorro retangular com fenda para a secagem de partículas. Possui o intuito de, futuramente, o mesmo ser construído a fim de serem realizados estudos relacionados à fluidodinâmica de partículas não esféricas e à estabilidade do jorro de forma que tais pesquisas contribuam para a facilidade de *scale-up* deste equipamento. Para atingir tal objetivo, foi escolhido o dimensionamento da coluna de leito de jorro retangular, da fenda e da tubulação entre o soprador de ar e a coluna. Em seguida, calculou-se a velocidade de mínimo jorro por meio de correlações disponíveis na literatura, selecionou-se o sistema de fornecimento de ar, assim como a instrumentação necessária para o sistema. Por fim, foi feito o desenho completo do sistema de leito de jorro.

**Palavras-chave:** Leito de jorro. Geometria retangular. *Scale-up*.

## ABSTRACT

KACHINSKI, K. D.; STAHLSCHMIDT, R. M. **Selection and sizing of a spouted bed system for drying application**. 2018. 63 p. Work of Conclusion Course (Graduation in Chemical Engineering) - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2018.

The rectangular spouted bed emerges as a possible solution to the limitations that are encountered in traditional cylindrical geometry, which are difficult to scale-up and reduce efficiency. By means of bibliographical revisions it can be seen that cylindrical spouted beds are the most used in Brazil, however, internationally, the rectangular geometry has been studied and also applied. The spouted bed is mainly used for drying, but can also be applied in the food industry, pharmaceutical, among others. The main purpose of this work was to select a rectangular spouted bed system for the drying of particles in order to be constructed in the future in order to carry out studies related to the fluid dynamics of non-spherical particles and the stability of the spout of form that such research contributes to the scale-up of this equipment. In order to achieve this objective, the design of the rectangular spouted bed column, the slot and the piping between the air blower and the column was chosen. Then, the minimum spout velocity was calculated by correlations available in the literature, the air supply system was selected, as well as the necessary instrumentation for the system. Finally, the complete design of the spouted bed system was made.

**Keywords:** Spouted bed. Rectangular geometry. Scale-up.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura de um leito de jorro .....	16
Figura 2 – Diagrama de Geldart para Classificação de Materiais Quanto à fluidização .....	17
Figura 3 – Regimes Fluidodinâmicos de um Leito de Jorro .....	19
Figura 4 – Curvas Típicas de Queda de Pressão em Função da Velocidade do Fluido .....	20
Figura 5 – Diagrama esquemático do equipamento utilizado por Martins et al. (2003) .....	22
Figura 6 – Esquema do leito de jorro utilizado por Rocha et al. (2008) .....	23
Figura 7 – Esquema de montagem do leito de jorro utilizado para elutriação utilizado por Bertuol et al. (2014) .....	24
Figura 8 – Esquema do equipamento experimental utilizado por Costa et al. (2015) .....	25
Figura 9 – Diagrama esquemático do leito de jorro cilíndrico em pequena escala para pirólise utilizado por Amutio et al. (2015) .....	26
Figura 10 – Configuração experimental para o leito de jorro de secagem utilizado por Chielle et al. (2015) .....	27
Figura 11 – Esquema da unidade experimental e geometria do leito utilizado por Xavier (2016) .....	28
Figura 12 – Esquema do leito de jorro estudado por Zanoelo (1994) .....	29
Figura 13 – Esquema da configuração experimental utilizada por Liu et al. (2007).....	30
Figura 14 – Imagem esquemática da configuração do equipamento experimental utilizado por Zhao et al. (2008) .....	31
Figura 15 – Configuração do equipamento ajustável utilizado por Salikov et al. (2015) .....	33
Figura 16 – Diagrama esquemático do leito de jorro bidimensional utilizado por Qiu et al. (2015) .....	34
Figura 17 – Esquema geral e vista de topo do leito de jorro bidimensional utilizado por Wang et al. (2016) .....	35
Figura 18 – Dimensionamento do leito utilizado por Yan et al. (2016) .....	36
Figura 19 – Planta laboratorial, geometria da câmara de processo e zona de spray em mesh da simulação realizada por Pietsch (2016) .....	37
Figura 20 – Esquema do leito de jorro bidimensional e da configuração do equipamento utilizado por Wang et al. (2017) .....	38
Figura 21 – Esquema do leito de jorro retangular com fenda e da configuração do equipamento utilizado por Parise et al. (2017) .....	40
Figura 22 – Figura esquemática das colunas A, B, C e D estudadas por Chen (2008) .....	42
Figura 23 – Diferentes tipos de fenda analisados por Chen (2008) .....	42
Figura 24 - Desenho esquemático do Leito de Jorro Retangular com Fenda selecionado .....	56
Figura 25 - Esquema do equipamento necessário para instalação do Leito de Jorro Retangular com Fenda Selecionado .....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões das colunas retangulares analisadas por Chen (2008) ...	41
Tabela 2 – Correlações e critérios para leitos de jorro retangular .....	44
Tabela 3 – Propriedades físicas e grupo de classificação das partículas utilizadas .....	48
Tabela 4 – Dimensões da Coluna.....	52
Tabela 5 – Velocidade de mínimo jorro encontrada para as partículas selecionadas .....	53
Tabela 6 – Queda de pressão máxima do leito encontrada para as partículas selecionadas .....	53
Tabela 7 – Cálculo da perda de carga na tubulação .....	54
Tabela 8 – Coeficiente de perda de carga e perdas de carga menores .....	54
Tabela 9 – Cálculo da potência nominal .....	54
Tabela 10 - Modelos de sopradores centrífugos da marca Aero Mack© .....	55

## LISTA DE NOMENCLATURAS

$A_{2D}$	Relação de energia necessária para produzir o jorro até o necessário para sustentá-lo, $Re_T Re_{mf} (d_p/\lambda)/Ar$ (-)
$A_C$	Área de seção transversal da tubulação ( $m^2$ )
$A_{or}$	Área do orifício da placa ( $m^2$ )
$Ar$	Número de Arquimedes, $\rho_g (\rho_s - \rho_g) g d_p^3 / \mu^2$ (-)
$c$	Constante (-)
$C_d$	Coefficiente de descarga (-)
$d$	Diâmetro do duto (m)
$D$	Diâmetro da tubulação (m)
$D_c$	Diâmetro da coluna (mm)
$D_i$	Diâmetro da fenda (mm)
$d_{or}$	Diâmetro do orifício da placa de orifício (m)
$d_p$	Diâmetro médio das partículas (mm)
$e$	Fator de compressibilidade (-)
$f$	Fator de atrito de Darcy (-)
$g$	Aceleração gravitacional ( $m/s^2$ )
$H_c$	Altura da coluna, a partir da fenda até o topo (mm)
$H_D$	Altura da base divergente do leito
$h_L$	Perda de carga (m)
$h_{L,m}$	Perda de carga adicional pelos acidentes (m)
$h_{L,total}$	Perda de carga total (m)
$H_{máx}$	Altura máxima de jorro do leito (mm)
$H_s$	Altura do leito fixo (mm)
$H_u$	Altura útil de elevação (m)
$K$	Coefficiente de perda de carga (-)
$l$	Comprimento do duto (m)
$L$	Comprimento da tubulação (m)
$L_b$	Largura da base (mm)
$L_f$	Espessura da fenda (mm)
$\dot{m}$	Vazão mássica (kg/s)

$m_g$	Vazão mássica do gás (kg/s)
$N$	Potência do ventilador (W)
$N_m$	Potência motriz do ventilador (W)
$P$	Pressão (Pa)
$P_1$	Queda de pressão máxima da coluna (Pa)
$Q$	Vazão de gás realmente deslocado pela ação do ventilador (m <sup>3</sup> /s)
$Re_D$	Número de Reynolds da tubulação, referente ao diâmetro da tubulação (-)
$Re_{mf}$	Número de Reynolds da partícula em $U_{mf}$ , $d_p U_{mf} \rho_g / \mu$ (-)
$Re_T$	Número de Reynolds da partícula em $U_T$ , $d_p U_T \rho_g / \mu$ (-)
$T_{eixo}$	Torque fornecido ao eixo (N.m)
$U_{mf}$	Velocidade de mínima fluidização (m/s)
$U_{ms}$	Velocidade de mínimo jorro (m/s)
$u_o$	Velocidade superficial do ar (m/s)
$U_T$	Velocidade terminal da partícula (m/s)
$v$	Velocidade (m/s)
$V$	Velocidade do gás (m/s)
$v_{ar,t}$	Velocidade do ar na tubulação (m/s)
$w$	Coeficiente de perda de pressão estática (-)
$y$	Coordenada cartesiana (m)
$\alpha$	Largura da coluna (mm)
$\beta$	Espessura da coluna (mm)
$\beta_d$	Razão do diâmetro do orifício da placa pelo diâmetro da tubulação (-)
$\gamma$	Peso específico do ar (N/m <sup>3</sup> ou kgf/m <sup>3</sup> )
$\gamma_e$	Expansão do ângulo do jorro (°)
$\Delta P_L$	Queda de pressão no tubo (Pa)
$\Delta P_{máx}$	Queda de pressão máxima da coluna (kPa)
$\Delta P_{or}$	Queda de pressão na placa de orifício (Pa)
$\Delta P_v$	Queda de pressão a ser superada pelo ventilador (Pa)
$\eta$	Rendimento total do ventilador (-)
$\theta$	Ângulo da base do leito (°)
$\varepsilon_R$	Rugosidade Relativa (-)
$\phi_{i,no}$	Porcentagem de partículas de diâmetro $d_i$ (-)
$\lambda$	Largura da fenda (mm)

- $\mu$  Viscosidade dinâmica do gás (kg/m.s)
- $\rho_g$  Densidade do gás (kg/m<sup>3</sup>)
- $\rho_s$  Densidade da partícula (kg/m<sup>3</sup>)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	<b>14</b>
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	<b>14</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
2.1 LEITO DE JORRO .....	15
2.2 CLASSIFICAÇÃO DE PARTÍCULAS .....	17
2.3 REGIMES FLUIDODINÂMICOS .....	18
2.4 MECANISMO FLUIDODINÂMICO .....	19
2.5 TRABALHOS DA LITERATURA SOBRE LEITOS DE JORRO .....	21
2.5.1 Leito em Geometria Cilíndrica .....	22
2.5.2 Leito em Geometria Retangular .....	29
2.6 CORELAÇÕES DA LITERATURA PARA OBTENÇÃO DA VELOCIDADE DE MÍNIMO JORRO E QUEDA DE PRESSÃO MÁXIMA EM LEITO DE JORRO RETANGULAR .....	41
2.6.1 Velocidade de Mínimo Jorro .....	45
2.6.2 Queda de Pressão Máxima no Leito .....	46
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>47</b>
3.1 SELEÇÃO DE SISTEMA LEITO DE JORRO RETANGULAR.....	47
3.2 MATERIAIS .....	47
3.3 CÁLCULO DAS PROPRIEDADES UTILIZADAS EM LEITO DE JORRO .....	48
3.4 INSTRUMENTAÇÃO .....	49
3.5 SISTEMA DE FORNECIMENTO DE AR .....	49
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>52</b>
4.1 SELEÇÃO DO LEITO DE JORRO RETANGULAR.....	52
4.2 VELOCIDADE DE MÍNIMO JORRO .....	52
4.3 QUEDA DE PRESSÃO MÁXIMA .....	53
4.4 SISTEMA DE FORNECIMENTO DE AR .....	53
4.5 DESENHO DO LEITO DE JORRO PLANEJADO .....	56
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	<b>58</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>59</b>
<b>APÊNDICE A – OBTENÇÃO DA VAZÃO MÁSSICA DO AR EM UMA PLACA DE ORIFÍCIO</b> .....	<b>62</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em 1954, observou-se que leitos fluidizados eram destinados a partículas finas, pois quando utilizados em partículas maiores (diâmetro superior a 1,0 mm) ocorria o regime “*slugging*”. Devido à tal dificuldade foi desenvolvido o leito de jorro como uma modificação do leito fluidizado (MATHUR, 1955).

O leito de jorro foi inicialmente utilizado para secagem de materiais granulares e, posteriormente, passou a ser aplicado em diversos outros processos que não envolvem apenas esses tipos de partículas, como: resfriamento, mistura, revestimento de materiais, secagem de pastas, granulação de produtos, entre outros (MATHUR; EPSTEIN, 1974). Logo, este tipo de leito possui aplicação em operações em que são necessários alguns requisitos, como um produto final que seja homogêneo e elevadas taxas de transferência de calor e massa.

Conforme foram sendo estudados os leitos de jorro, verificou-se algumas limitações quanto à geometria tradicional cilíndrica, como por exemplo, a dificuldade em realizar “*scale-up*”, além de possuírem eficiência reduzida. Com o objetivo de solucionar esses problemas, Mujumdar (1984, apud. EPSTEIN; GRACE, 2011) propôs uma nova geometria, denominada leito de jorro bidimensional, possibilitando “*scaling up*” deste tipo de sistema. Mais tarde, Dogan et al. (2000) renomearam este tipo de leito de jorro e, desde então, é conhecido como leito de jorro retangular com fenda (“Slot-Rectangular Spouted Bed”, SRSB). Neste novo tipo de geometria substitui-se a simetria axial, utilizada nos leitos cilíndricos, por uma simetria planar, tendo-se também paredes verticais paralelas. O ar entra na coluna por meio de uma fenda na seção inferior e dispersa-se à medida que ascende pela seção inclinada (EPSTEIN; GRACE, 2011).

Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo a seleção de um sistema de leito de jorro retangular com fenda, com o intuito de futuramente montar e estudar sobre a fluidodinâmica de partículas não esféricas e à estabilidade do jorro, visando realizar pesquisas que contribuam para a facilidade de *scale-up*. Como isso será possível? Será feito por meio do estudo e da revisão de artigos bibliográficos, com a finalidade de encontrar parâmetros adequados para a seleção de um sistema em leito de jorro com fenda ideal.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem o objetivo a seleção e dimensionamento de um sistema de leito de jorro retangular com fenda para ser utilizado em processos de secagem de partículas granulares e não granulares.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Realizar a seleção de um sistema de leito de jorro;
- Dimensionar a tubulação;
- Calcular a velocidade de mínimo jorro e a altura máxima de jorro, por meio de correlações disponíveis na literatura;
- Selecionar o sistema de fornecimento de ar para fluidizar as partículas;
- Selecionar a instrumentação necessária para o leito de jorro: medidores de pressão, temperatura, vazão de ar.
- Desenhar o sistema completo de leito de jorro.

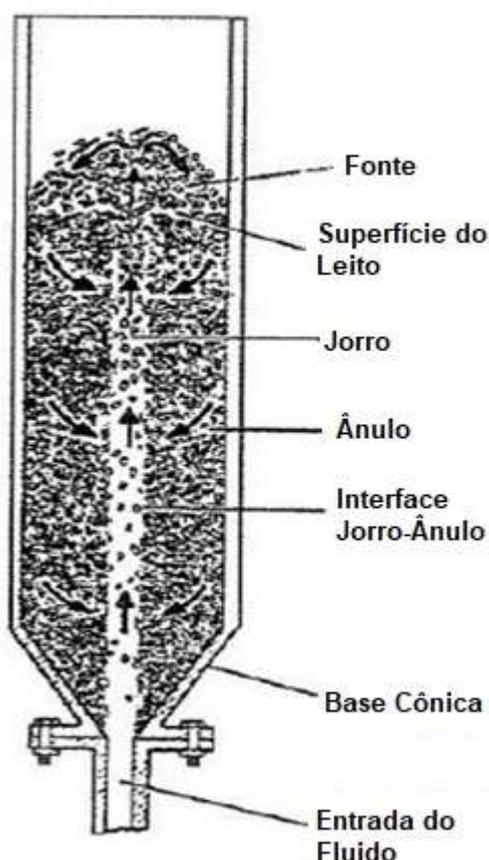
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção possui como finalidade abordar sobre o funcionamento do leito de jorro, assim como suas particularidades: classificação de partículas, regimes e mecanismo fluidodinâmicos e a revisão dos trabalhos encontrados na literatura sobre leitos de jorro cilíndricos e retangulares.

### 2.1 LEITO DE JORRO

Leito de jorro é composto por um recipiente aberto no topo, onde estarão contidas as partículas sólidas. Na base do leito, em seu centro, há um orifício por onde será injetado um fluido, normalmente o ar. Quando a vazão de entrada do ar é suficientemente alta, a ponto de vencer a queda de pressão formada pelas partículas ali contidas, elas são carregadas pneumáticamente de forma ascendente pelo centro, região que é denominada jorro, até onde desaceleraram e caem na região anular, entre o jorro e a parede do leito. Em um fluxo lento, são levadas por meio da ação da gravidade novamente para a região de jorro. Desta forma, desenvolve-se um movimento cíclico e contínuo, como mostra a Figura 1 (MATHUR, 1955).

Figura 1 - Estrutura de um leito de jorro



Fonte: Adaptado de Mathur e Gishler (1955)

Quando o leito de jorro opera em regime dinâmico estável, pode-se identificar três regiões:

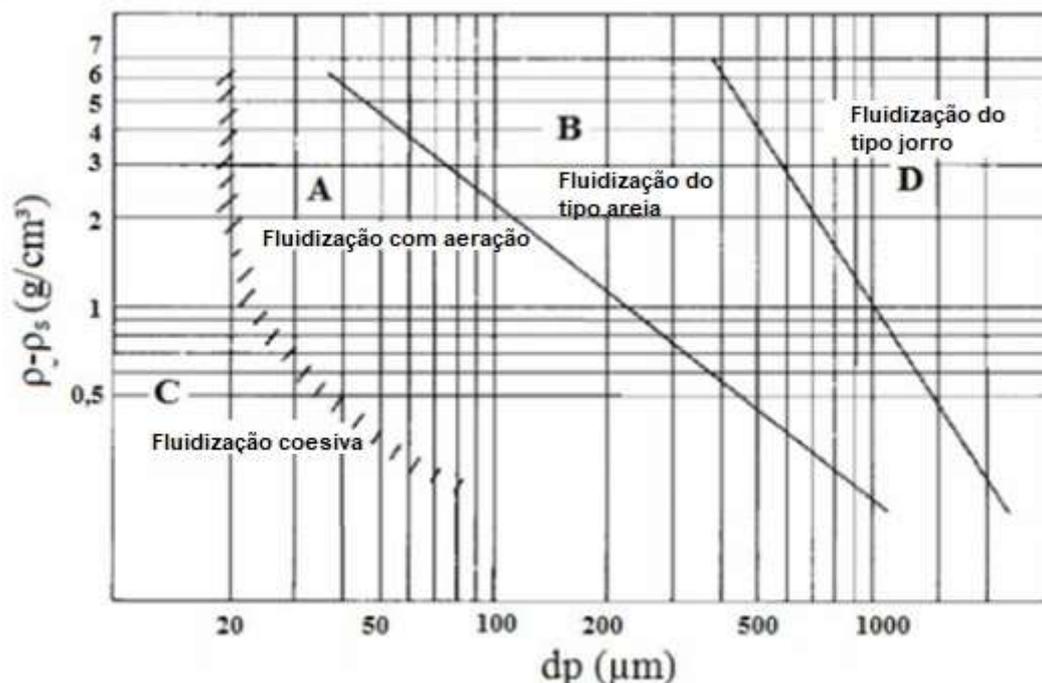
- Região de jorro (ou central): região de alta porosidade que devido à elevada velocidade do fluido, as partículas acabam sendo transportadas pneumáticamente de forma contracorrente com o fluido.
- Região de fonte: as partículas já estão movendo-se de forma mais desacelerada, próximas da parede.
- Região anular: de forma contracorrente ao fluxo de ar, as partículas deslizam, devido à ação da força gravitacional, até a região central.

Este tipo de leito proporciona altas taxas de transferência de calor e de massa devido ao movimento cíclico das partículas formado pelo jorro que permite alcançar um elevado grau de contato entre o fluido e a partícula (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

## 2.2 CLASSIFICAÇÃO DAS PARTÍCULAS

As partículas podem ser classificadas, de forma qualitativa, por meio do diagrama de Geldart (1973), onde são classificadas de acordo com o comportamento de fluidização. Este diagrama é apresentado a seguir na Figura 2.

Figura 2 – Diagrama de Geldart para Classificação de Materiais Quanto à Fluidização



Fonte: Adaptado de Geldart (1986)

Analisando o diagrama, pode-se identificar quatro classificações. Sendo elas:

- Grupo C: partículas mais finas (ou coesivas), com diâmetro de até 100  $\mu\text{m}$ , que por possuírem forças interpartículas, são de difícil fluidização, como por exemplo a farinha;
- Grupo A: partículas com diâmetro entre 20 e 1000  $\mu\text{m}$  (pequeno a médio), normalmente com densidade inferior a 1400  $\text{kg/m}^3$ , que são facilmente fluidizáveis, como por exemplo alguns catalisadores de craqueamento;
- Grupo B: partículas com diâmetros entre 40 e 500  $\mu\text{m}$  e densidades entre 1400 e 4000  $\text{kg/m}^3$  tendo como principal exemplo a areia;
- Grupo D: partículas grandes e/ou densas, com diâmetros maiores que 650  $\mu\text{m}$ , o que faz com que não tenham uma característica para boa fluidização, desta forma, são as partículas ideais para um leito de jorro, como por exemplo partículas de trigo (GELDART, 1986).

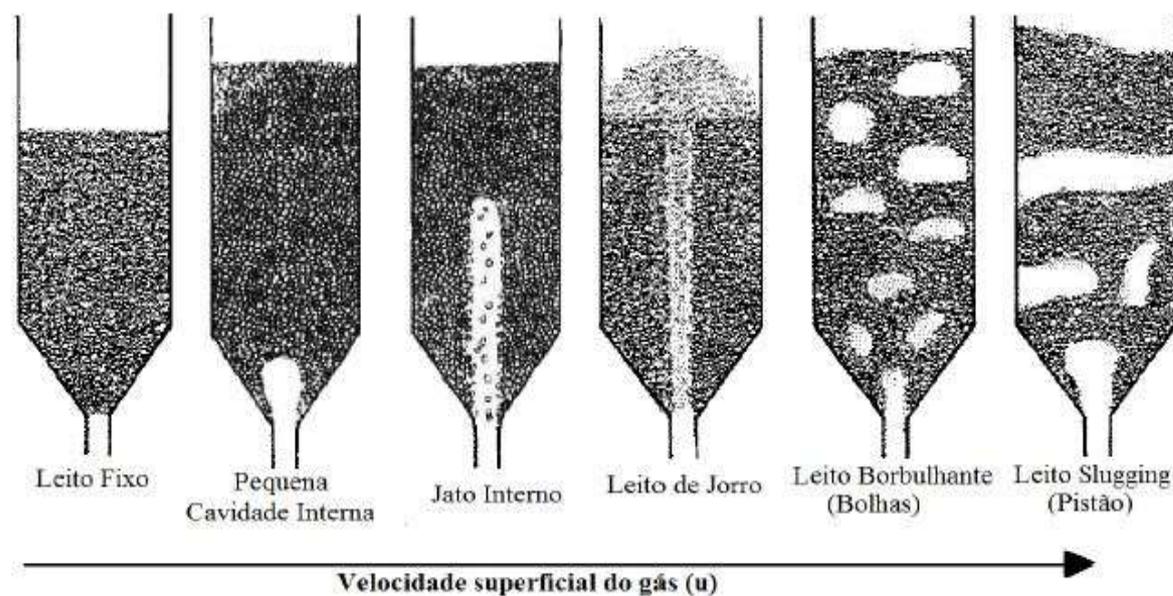
### 2.3 REGIMES FLUIDODINÂMICOS

Os regimes fluidodinâmicos (Figura 3) de um leito de jorro estão relacionados principalmente com a geometria do leito e propriedades físico-químicas do fluido utilizado e das partículas presentes nele (BUTZGE, 2012).

A partir de um equipamento, com dimensões e configurações já estabelecidas, é possível observar os regimes fluidodinâmicos aumentando-se a velocidade do fluido utilizado. No regime de leito fixo, tem-se que a velocidade do fluido ainda é insuficiente para movimentar as partículas dentro do leito e o ar apenas percola através dos espaços vazios que há entre as partículas (BUTZGE, 2012).

Quando se tem uma velocidade de fluido acima do jorro mínimo, alcança-se o regime de jorro, onde ocorre o movimento cíclico das partículas. Este fenômeno ocorre para um certo intervalo de velocidade do fluido (gás) e depende também de combinação das características das partículas (sólido) e das configurações do equipamento utilizado. A estabilidade de jorro depende da altura de leito fixo das partículas ( $H_s$ ), esta altura pode ser correlacionada com os regimes fluidodinâmicos e com a velocidade superficial do gás por meio de diagramas existentes, como os de regimes ou de fase (BUTZGE, 2012).

Se for aumentada a velocidade do fluido além da faixa estabelecida para ter-se um leito de jorro, pode ocorrer instabilidades no regime, transformando-o em um leito borbulhante, que é considerado um leito fluidizado de má qualidade. Aumentando-se ainda mais a velocidade, pode ocorrer o regime de “*slugging*”, onde o movimento das partículas dentro do leito é lento e indesejável na maioria dos processos (MATHUR; EPSTEIN, 1974; EPSTEIN; GRACE, 2011).

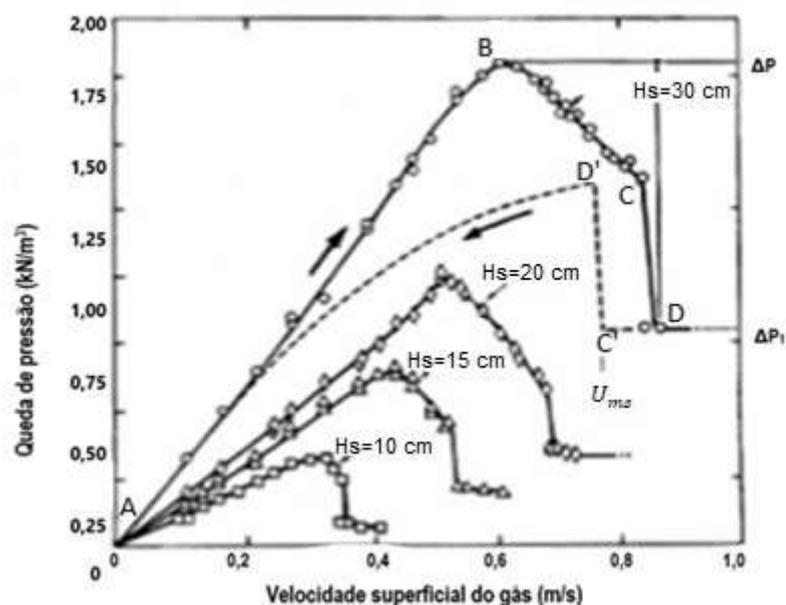
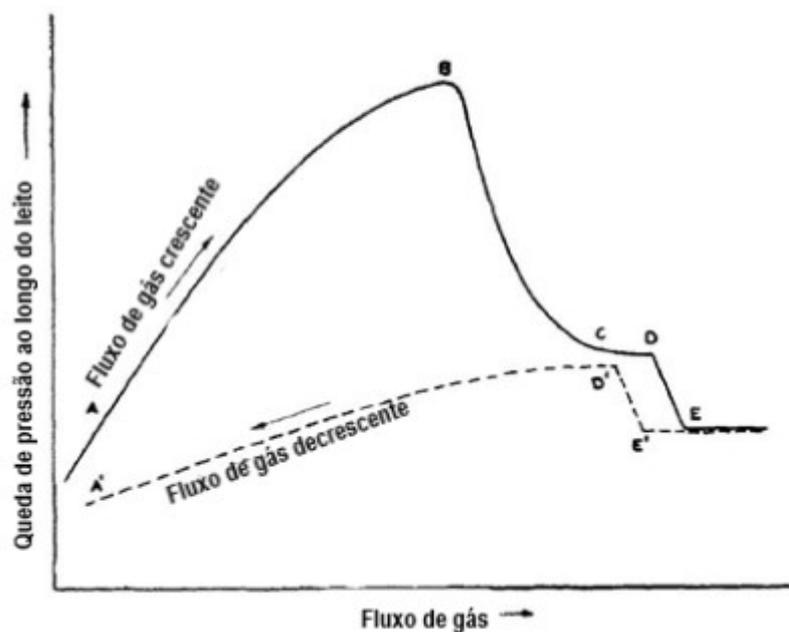
**Figura 3 – Regimes Fluidodinâmicos de um Leito de Jorro**

Fonte: Adaptado de Mathur e Epstein (1974)

## 2.4 MECANISMO FLUIDODINÂMICO

Pode-se facilmente analisar o mecanismo de transição dos regimes fluidodinâmicos por meio do gráfico da curva de queda de pressão *versus* a velocidade superficial do gás, que é conhecida por curva fluidodinâmica (Figura 4).

Figura 4 – Curvas Típicas de Queda de Pressão em Função da Velocidade do Fluido



Fonte: Adaptado de Mathur e Epstein (1974)

Mathur e Epstein (1974) em seus estudos determinaram que, na região entre os pontos “A” e “B”, quando a taxa de fluxo de ar é baixa, o gás passa sem perturbar as partículas, portanto a queda de pressão aumenta com o incremento da velocidade do gás.

No instante em que a velocidade do gás se torna suficientemente elevada para empurrar as partículas, forma-se uma cavidade acima da região central, sendo esta

relativamente vazia. As partículas ao redor desta cavidade são comprimidas contra o material acima e formam um arco compactado que oferece uma maior resistência ao fluxo. Porém, apesar da existência da cavidade, a queda de pressão total do leito continua a aumentar.

Aumentando-se ainda mais o fluxo de gás, a cavidade alonga-se até a formação de um jorro interno, porém mantendo-se ainda o arco compactado acima do jorro interno, de forma que a queda de pressão continua a aumentar por todo o leito até atingir seu valor máximo (ponto B).

Conforme aumenta-se a vazão além do ponto B, a altura da cavidade oca torna-se grande em comparação com a do material compactado acima. Assim, a queda de pressão começa a diminuir ao longo dos pontos BCD.

No ponto C, há partículas deslocadas do centro suficientes para causar uma expansão significativa do leito o que faz com que a redução da queda de pressão seja interrompida pela pequena região de fluxo de gás, representada entre os pontos C e D. A região entre os pontos C e D, quando se tem o jorro interno, é instável, podendo-se observar este expandir e contrair alternadamente ao longo do leito.

A partir deste momento, com apenas um pequeno aumento na taxa de fluxo do ar ocorre a ruptura da superfície do leito e a concentração de sólidos acima do jorro diminui, sendo assim, conseqüentemente ocorre a diminuição na queda de pressão até o ponto E, onde tem-se um jorro móvel e estável no leito.

Com mais aumento no fluxo de gás, este apenas passa através da região de jorro, que agora é o caminho com menor resistência, fazendo com que tenha um aumento em sua altura, porém não ocorre alteração na queda de pressão total. Sendo assim, além do ponto E, a queda de pressão é mantida sempre constante.

No caso de ocorrer diminuição lenta do fluxo de gás a partir deste ponto, o leito permanecerá em estado de jorro até o ponto E', este representa a condição de mínimo jorro. A partir deste, mantendo-se a redução do fluxo, ocorrerá o colapso do jorro e a queda de pressão aumentará repentinamente até o ponto D' e em seguida, diminui constantemente com a redução da taxa de fluxo (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

## 2.5 TRABALHOS DA LITERATURA SOBRE LEITOS DE JORRO

Desde a sua descoberta em 1954, por Gishler e Mathur, o leito de jorro vem sendo amplamente estudado em âmbito mundial.

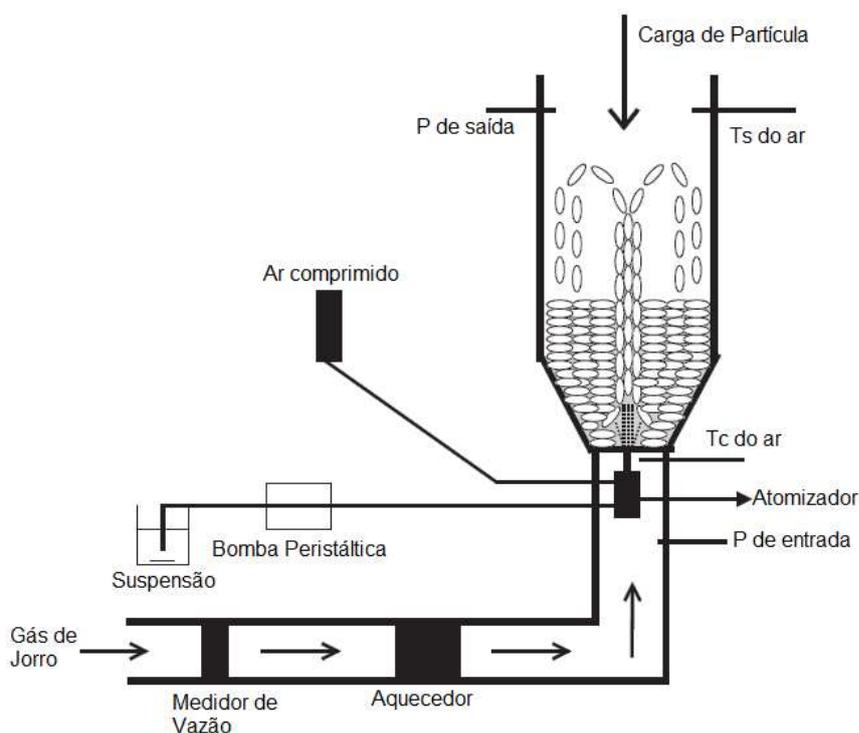
Por meio da revisão de artigos publicados pode-se perceber que o leito de jorro em geometria cilíndrica continua sendo o mais utilizado por pesquisadores de diversas áreas, embora o leito retangular esteja sendo utilizado em pesquisas e tendo seu funcionamento analisado.

A seguir, cita-se alguns dos artigos encontrados.

### 2.5.1 Leitos em Geometria Cilíndrica

Em 2003, Martins et al. estudaram a utilização do leito de jorro para aplicação de revestimento entérico em cápsulas gelatinosas duras por meio da utilização de um leito de jorro. Os experimentos foram realizados utilizando um leito de jorro cilíndrico com coluna de 150 mm de diâmetro e angulação da base cônica de  $40^\circ$  e diâmetro do orifício de entrada do gás de 33 mm (Figura 5). O material utilizado para a confecção do leito de jorro foi aço inoxidável. A composição de revestimento utilizada foi composta de 15% de Eudragit L30 D55, 3,00 % de trietil citrato (plastificante), 0,15% de carboximetilcelulose, 4,85% talco farmacêutico e 77% de água destilada. Também foram empregadas, como suporte para a aplicação de revestimento, cápsulas duras gelatinosas com dimensões de 10,4 mm e 9,3 mm de diâmetro.

**Figura 5 – Diagrama esquemático do equipamento utilizado por Martins et al. (2003)**



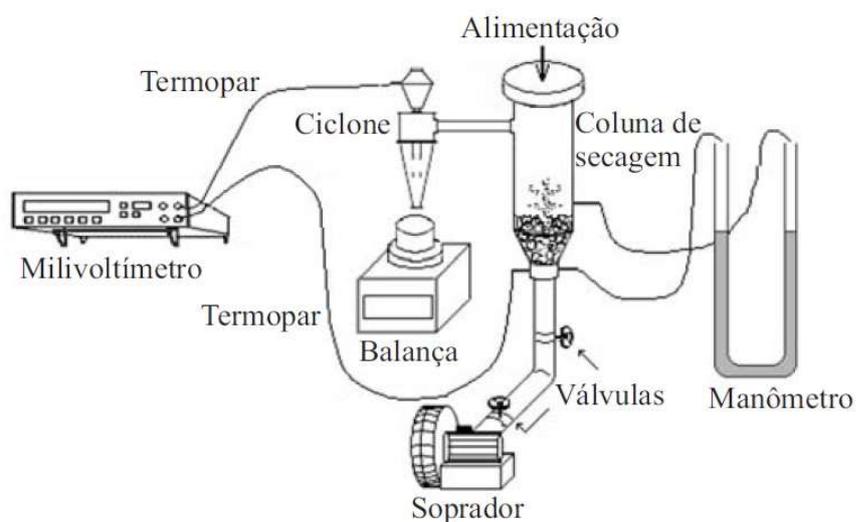
**Fonte: Martins et al. (2003)**

A fluidodinâmica do equipamento foi caracterizada por meio da velocidade de mínimo jorro, queda de pressão máxima no leito e queda da pressão de jorro estável. Os resultados obtidos puderam proporcionar a melhor condição para aplicação do revestimento de cápsulas, assim como quais as massas de revestimento produzem um melhor efeito gastro-resistente.

Rocha et al. (2008) estudaram a cinética de produção de levedura seca em um leito de jorro com partículas inertes, em que trabalharam com alimentação intermitente de levedura. Foram feitos onze experimentos em que o objetivo de estudo foi a influência da concentração de levedura e velocidade do ar na entrada sobre a cinética de produção da levedura seca.

Foi utilizada levedura do gênero *Saccharomyces cerevisiae* compactada como alimentação no secador. Como material inerte foram utilizadas partículas de poliestireno com diâmetro de 3,3 mm e densidade de  $1045 \text{ kg/m}^3$ , esfericidade igual a 0,87 e porosidade do leito fixo de 0,41. O secador de leito de jorro era de base cônica de acrílico, com ângulo interno de  $60^\circ$ , coluna de acrílico de diâmetro interno de 0,103 m, 0,253 m de altura e diâmetro interno da base cônica de 0,028 m. A temperatura do ar de secagem foi de  $43 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , com umidade relativa de 65%, aproximadamente. O esquema de montagem do equipamento está ilustrado na Figura 6.

**Figura 6 – Esquema do leito de jorro utilizado por Rocha et al. (2008)**



**Fonte: Rocha et al. (2008)**

Por meio do experimento, os autores concluíram que os resultados obtidos em escala laboratorial seguem para boas perspectivas de aplicação industrial como

suplemento alimentar. Também se constatou perdas de carga inferiores a 400 Pa, embora, de acordo com os pesquisadores, ainda fossem necessários estudos complementares a fim de se determinar uma melhor previsão das capacidades de produção.

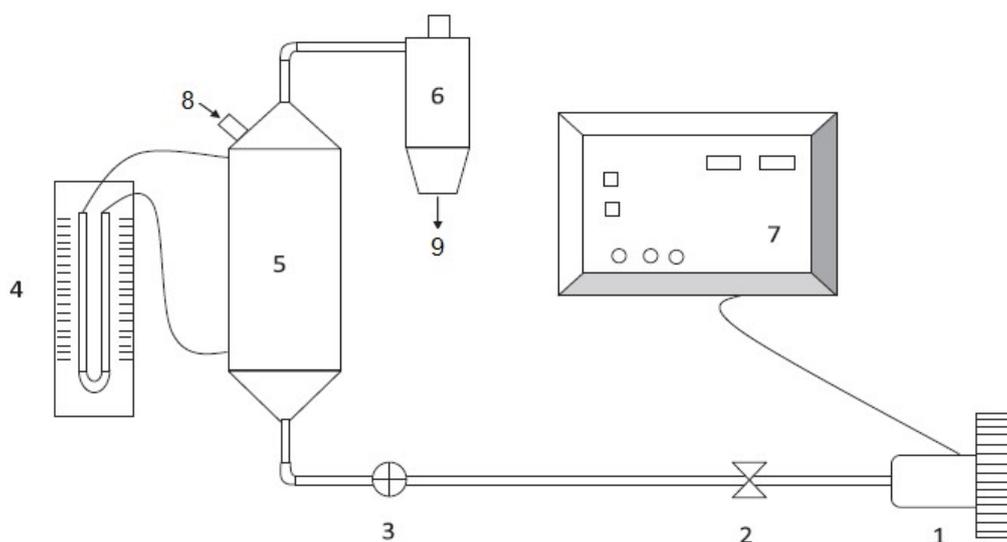
Como partículas inertes, foram utilizadas partículas de polietileno de alta densidade, com diâmetro médio de 3,09 mm e densidade de 899 kg/m<sup>3</sup>.

Ao final do processo os autores puderam avaliar a influência das condições de operação tanto na qualidade do produto final, como no rendimento. Conseguiu-se estabelecer uma condição ótima de secagem em que se obteve um pó nutritivo e que continha baixo teor de umidade.

Bertuol et al. (2014) realizaram uma pesquisa sobre a aplicação de leito de jorro na reciclagem de baterias de íon-lítio. Esta pesquisa foi realizada em duas etapas, onde a última consistiu na trituração das baterias e separação de seus diferentes materiais por meio de elutriação em um leito de jorro.

Para isso foi utilizado um leito com as seguintes dimensões: diâmetro da parte cilíndrica – 0,17 m; altura da parte cilíndrica – 0,54 m; diâmetro da base cônica – 2 mm; altura da base cônica - 0,14 m; diâmetro do topo cônico – 0,07 m e altura do topo cônico – 0,07 m. A montagem do leito utilizado para elutriação está ilustrado na Figura 7.

**Figura 7 – Esquema de montagem do leito de jorro utilizado para elutriação utilizado por Bertuol et al. (2014)**

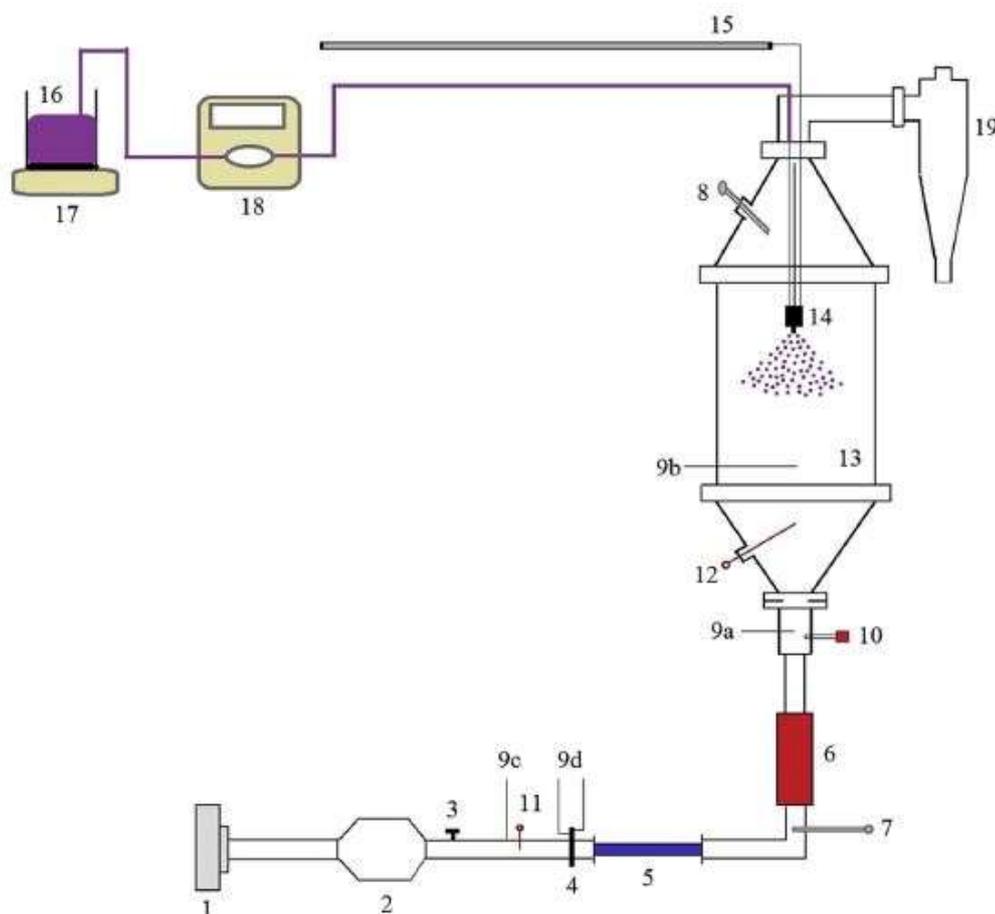


**1-ventilador; 2-válvula de controle; 3-anemômetro; 4-leito de jorro; 5-manômetro ; 6-ciclone; 7-painel de controle;8-entrada de pilhas moídas; 9-material separado.**  
**Fonte: Bertuol et al. (2014)**

Os autores concluíram que a elutriação em leito de jorro é uma maneira simples e eficaz de obter a separação dos diferentes materiais (polímeros, metais, materiais ativos de eletrodo) presentes em tal tipo de bateria.

Costa et al. (2015) pesquisaram os efeitos das condições de operação sobre o rendimento e a qualidade do pó de açaí produzido em leito de jorro. O objetivo foi de investigar a viabilidade da secagem de açaí em um leito de jorro de geometria cilíndrica por meio da avaliação das condições de operação no rendimento e na qualidade do produto. O leito utilizado possuía as seguintes dimensões: diâmetro da coluna cilíndrica – 0,20 m, altura – 0,30 m, altura da base cônica – 0,14 m e ângulo da base cônica – 60°. As temperaturas do ar de secagem foram 55, 65 e 75 °C. O equipamento utilizado está ilustrado na Figura 8.

**Figura 8 – Esquema do equipamento experimental utilizado por Costa et al. (2015)**



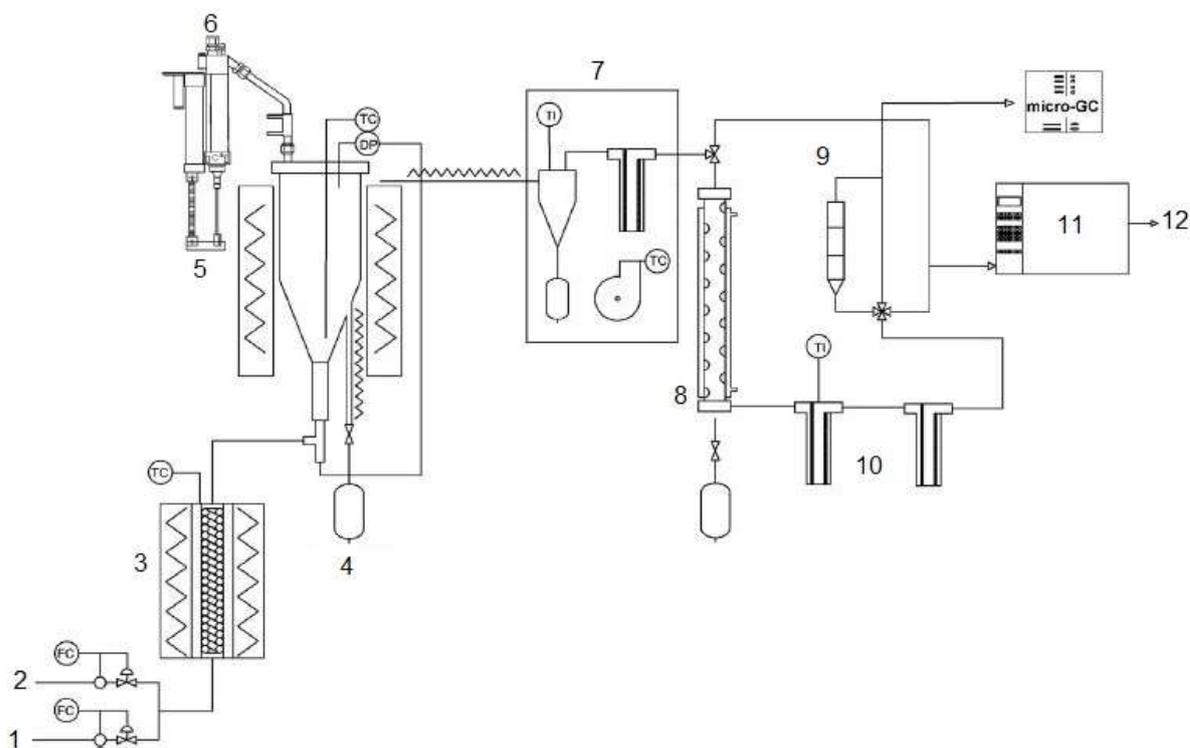
1-ventilador; 2-resfriador; 3-válvula de controle; 4-placa de orifício; 5-leito de sílica; 6-aquecedor elétrico; 7,8-termohigrômetros; 9-medidores de pressão; 10,11,12-termopares; 13-leito de jorro; 14-bico de pulverização; 15-linha de ar comprimido; 16-pasta (açaí-maltodextrina); 17-agitador magnético; 18-bomba peristáltica; 19-ciclone.

Fonte: Costa et al. (2015)

Amutio et al. (2015) estudaram o processo de pirólise rápida de resíduos de eucalipto em um reator de leito de jorro cônico. Para isto, foi estudado um leito de jorro, em pequena escala e de forma contínua, para aplicação em pirólise rápida de um setor florestal de resíduos de *Eucalyptus globulus* compostos por madeira, casca e folhas.

As dimensões do leito utilizado são: altura total – 0,34 m; diâmetro da seção cilíndrica - 0,123 m; altura da seção cônica – 0,205 m; diâmetro de fundo – 0,02 m e ângulo da seção cônica – 25°. O esquema de montagem dos equipamentos está ilustrado na Figura 9.

**Figura 9 – Diagrama esquemático do leito de jorro cilíndrico em pequena escala para pirólise utilizado por Amutio et al. (2015)**



1-entrada de ar; 2-entrada de nitrogênio; 3-pré aquecedor; 4-coletor de sólidos; 5-reator; 6-sistema de alimentação; 7-ciclone e filtro; 8-condensador; 9-medidor de fluxo; 10-filtros de coalescência; 11-cromatógrafo gasoso; 12-saída de gás.  
Fonte: Amutio et al. (2015)

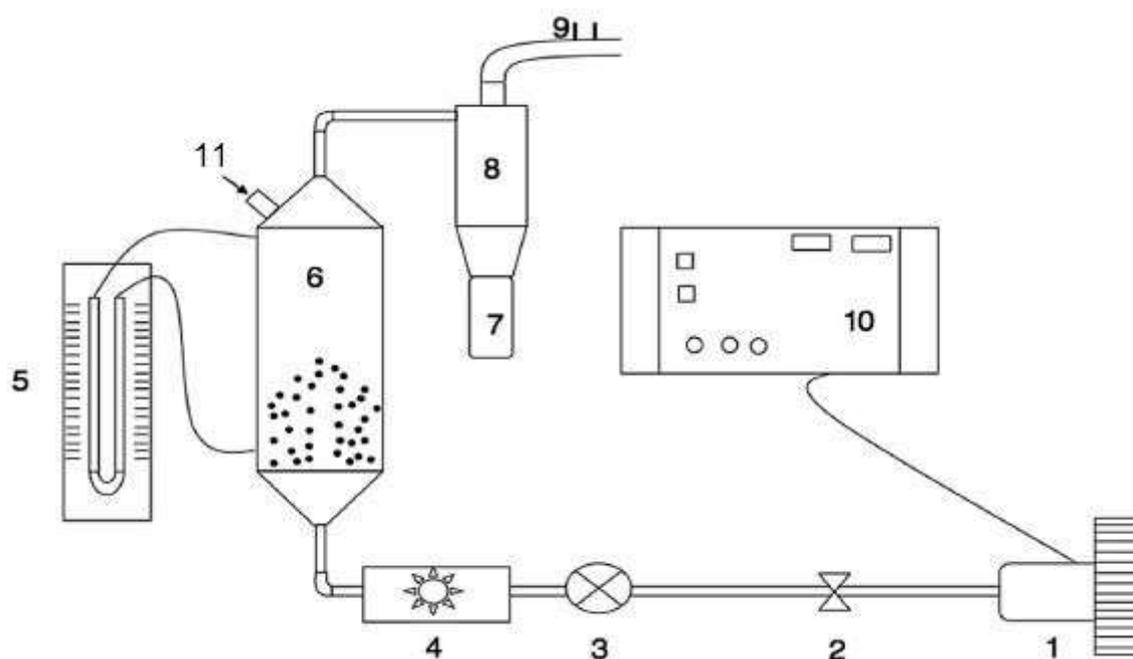
Os autores observaram que o método de pirólise em pequena escala contínua se mostrou uma tecnologia adequada e versátil na pirólise de materiais florestais heterogêneos, que podem conter madeira, casca e folhas além de resíduos de eucalipto derivados do setor de fabricação de papel. Obteve-se um alto rendimento

de bio-óleo, 75,4% em peso, que é um aspecto muito positivo para a proposta desta tecnologia alternativamente aos leitos fluidizados.

Chielle et al. (2015) estudaram a secagem de sementes de mamão em leito de jorro para posterior produção de óleo. Foram utilizadas diversas variáveis, como temperatura, velocidade do ar, tempo de secagem, para buscar uma redução de umidade e melhora na produção de óleo e no perfil dos ácidos graxos.

As dimensões do leito utilizado são: diâmetro da parte cilíndrica – 0,17 m; altura da parte cilíndrica – 0,54 m; diâmetro da base cônica – 0,002 m; altura da base cônica – 0,14 m; diâmetro do topo cônico – 0,07 m e altura do topo cônico – 0,07 m. O esquema de montagem do equipamento utilizado está ilustrado na Figura 10.

**Figura 10 – Configuração experimental para o leito de jorro de secagem utilizado por Chielle et al. (2015)**



1-soprador de ar; 2-válvula de controle; 3-anemômetro; 4-aquecedor; 5-manômetro; 6-leito de jorro; 7-coletor; 8-ciclone; 9-psicrômetro; 10-painel de controle; 11-entrada da semente de mamão.

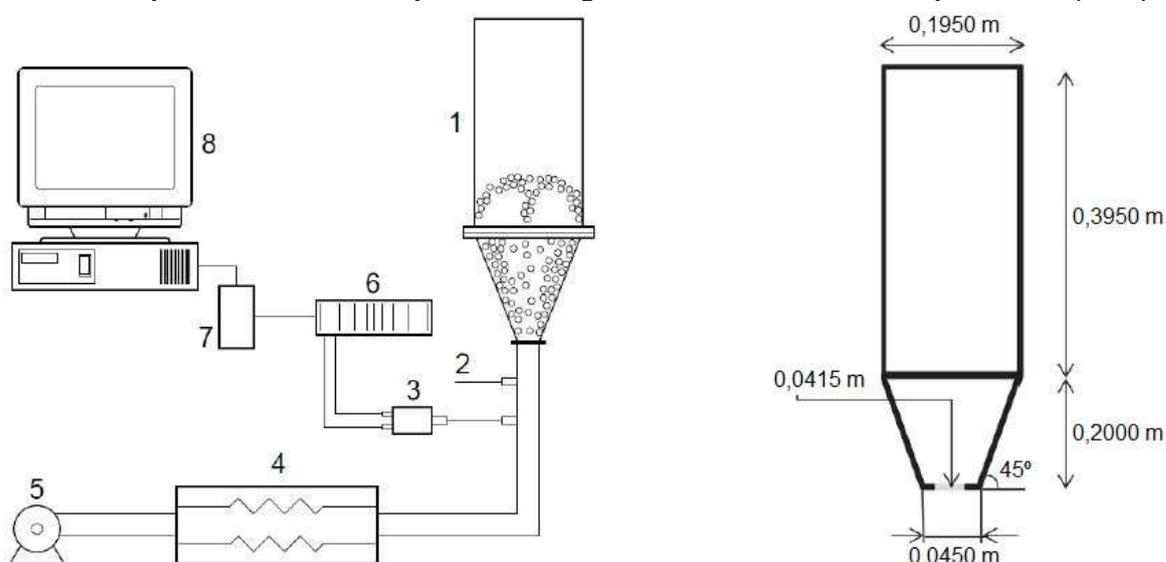
Fonte: Chielle et al. (2015)

De acordo com os autores, a secagem em leito de jorro fornece sementes de mamão com teor de umidade adequado para serem armazenadas e processadas posteriormente, independentemente da condição experimental utilizada. Sendo assim, esta técnica de secagem é uma alternativa para secagem das sementes de mamão.

Xavier (2016) utilizou um leito de jorro cilíndrico para a pirólise da macadâmia. Com relação ao reator, uma análise do comportamento fluidodinâmico da mistura da casca de macadâmia e areia foi realizado, avaliando como altura do leito fixo (0,06; 0,08 e 0,10 m) fração mássica de biomassa (25, 50 e 75%) influenciam na condição de mínimo jorro e segregação das partículas.

O leito utilizado possuía as seguintes dimensões: diâmetro da coluna cilíndrica – 0,195 m, altura da coluna cilíndrica – 0,395 m, altura da base cônica – 0,2 m e ângulo da base cônica – 45°. O esquema do equipamento utilizado encontra-se ilustrado na Figura 11.

**Figura 11 – Esquema da unidade experimental e geometria do leito utilizado por Xavier (2016)**



1-leito de jorro cônico; 2-termopar; 3-transdutor de pressão; 4-sistema de aquecimento; 5-soprador; 6-condicionador de sinais; 7-placa de aquisição de dados; 8-microcomputador.  
Fonte: Xavier (2016)

O autor verificou que os leitos com maiores alturas são mais pesados, resultando em maiores valores de queda de pressão e velocidade do ar para manter o regime de jorro. Além disso, maiores frações mássicas de biomassa conferiram maior porosidade ao leito na região anular, o que reduziu a resistência ao escoamento do fluido, diminuindo também a velocidade do ar e a queda de pressão na condição de jorro mínimo. A segregação da mistura foi maior na base do leito. Adicionalmente, os autores verificaram que a mistura de casca de macadâmia e areia, nas condições utilizadas de fração mássica de 25, 50 e 75% e altura do leito fixo de 0,06, 0,08 e 0,10 m, apresenta um comportamento fluidodinâmico de um leito de jorro com

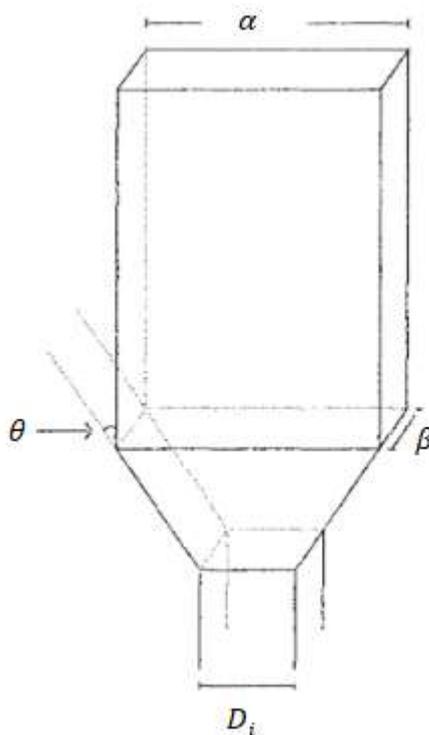
monopartículas e que tal intervalo de fração mássica de biomassa é adequado para proceder a pirólise.

### 2.5.2 Leitos em Geometria Retangular

No presente trabalho foi pesquisado sobre outras geometrias utilizadas nos leitos de jorro e constatou-se que além da geometria do tipo cone-cilíndrico, são utilizadas geometrias do tipo retangular. A seguir, cita-se algumas revisões sobre esse tipo de leito.

Zanoelo (1994) estudou a variação da largura do leito de jorro retangular que foi feito por meio de um modelo matemático e assim pode-se comparar com o experimental construído em acrílico. Foram desenvolvidas duas expressões empíricas para o leito de jorro a fim de que fossem determinados dois parâmetros, a largura média da região de jorro e o ângulo de expansão na interface jorro-ânulo. Por fim, descreveu-se o comportamento fluidodinâmico da região de jorro por meio de balanços de massa e da quantidade de movimento.

**Figura 12 – Esquema do leito de jorro estudado por Zanoelo (1994)**

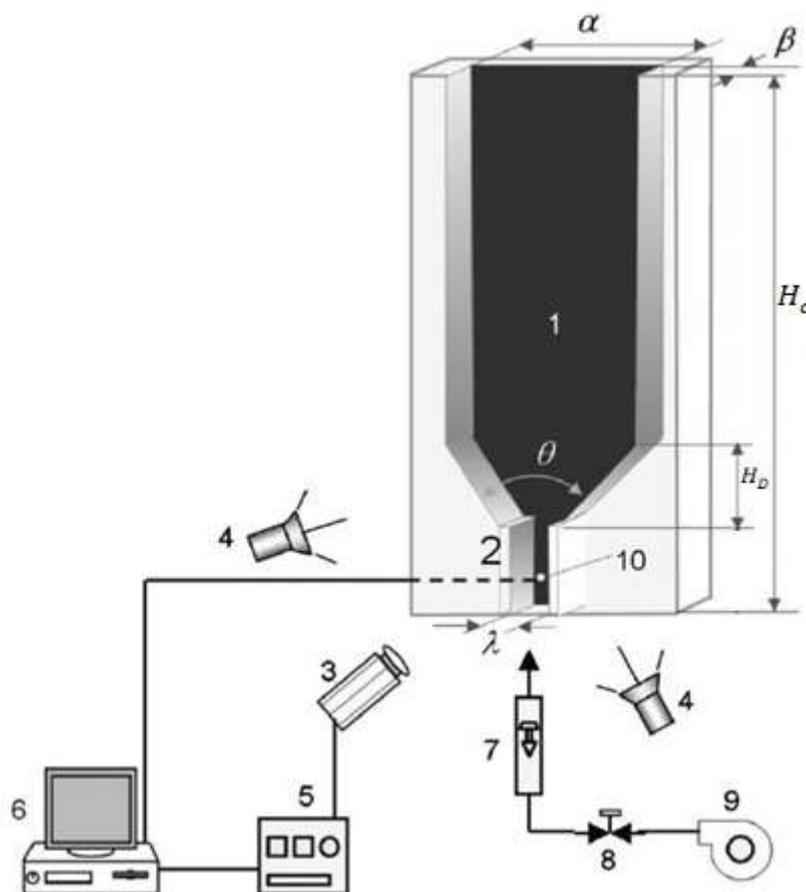


Fonte: Zanoelo (1994)

Liu et al. (2007) investigaram os comportamentos de flutuação média e flutuante de sólidos granulares em um leito de jorro bidimensional por velocimetria por imagem de partículas (PIV), por meio de um *software* que tem a função de medir a velocidade de partículas, além de densidade espectral, velocidade média de partículas e temperatura granular.

O leito utilizado (ilustrado na Figura 13) consistia em uma coluna retangular com largura ( $\alpha$ ) igual a 152 mm, espessura ( $\beta$ ) igual a 15 mm, base com ângulo ( $\theta$ ) igual a  $60^\circ$  e altura igual a 115,2 mm, a altura total do leito ( $H_c$ ) era 600 mm. Como partículas inertes foram utilizadas esferas de vidro com diâmetro de 2 mm e densidade de  $2380 \text{ kg/m}^3$ .

Figura 13 – Esquema da configuração experimental utilizada por Liu et al. (2007)



1-leito de jorro bidimensional; 2-placa de entrada; 3-câmera CCD de alta velocidade; 4-luz fluorescente; 5-câmera de controle; 6-computador; 7-rotâmetro; 8-válvula, 9-ventilador; 10-transdutor de pressão.

Fonte: Liu et al. (2007)

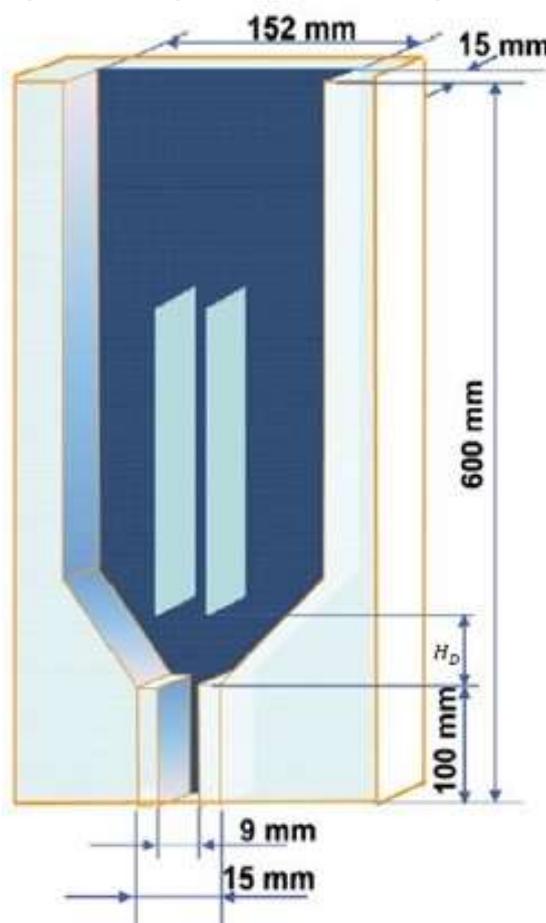
Ao final do experimento, o algoritmo PIV utilizado mostrou-se eficaz para obtenção de dados quanto à geometria do bico, do movimento das partículas na região anular, distribuição da temperatura granular, entre outros.

Pela simulação, pode-se concluir que quanto maior a profundidade do leito, diminui-se a velocidade mínima de jorro e a queda de pressão máxima do leito, até que se atinge um nível estável em 0,1 m. No leito *quasi-3 D* o regime de jato constante não foi alcançado.

Zhao et al. (2007) estudaram o comportamento do fluxo de partículas em um leito de jorro bidimensional por meio da velocimetria de imagem de partículas (PIV) e da técnica combinada de método de elementos discretos e computação dinâmica de fluidos (DEM-CFD) sem desconsiderar o efeito de turbulência do gás.

As dimensões do leito utilizado encontram-se na Figura 14.

Figura 14 – Imagem esquemática da configuração do equipamento experimental utilizado por Zhao et al. (2008)



Fonte: Zhao et al. (2008)

O ângulo da seção cônica utilizado foi de  $60^\circ$ , as partículas inertes utilizadas foram esferas de vidro com diâmetro de 2 mm e densidade de  $2380 \text{ kg/m}^3$ .

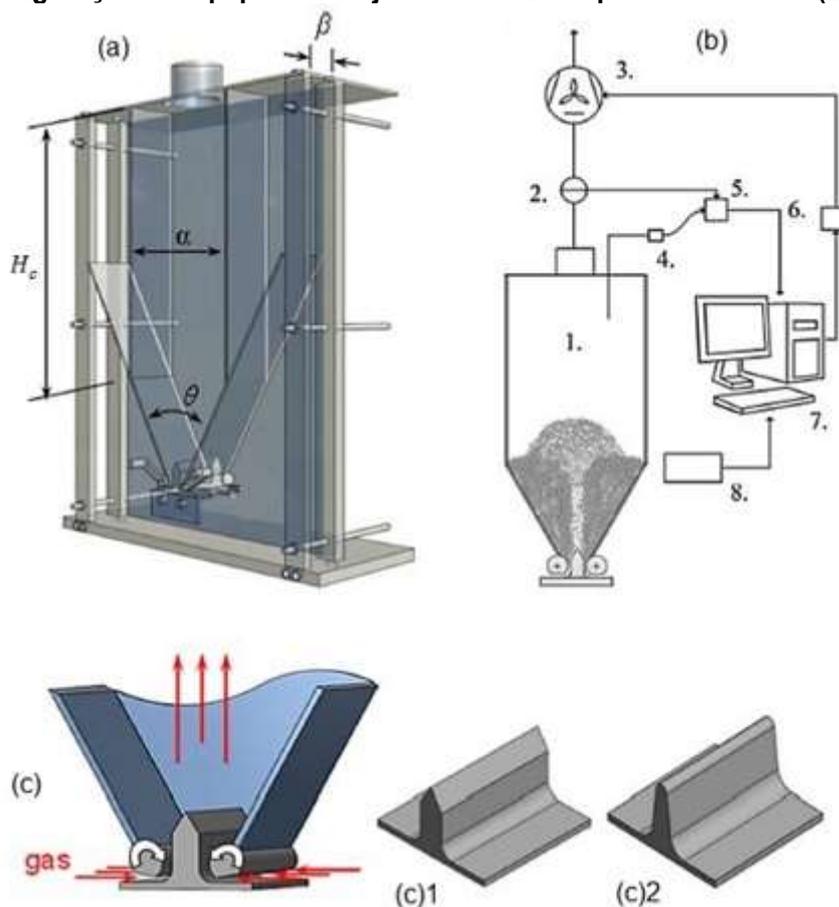
Ao final, os resultados obtidos pelos autores com o PIV indicaram que o arraste no bico tem pouca influência na velocidade vertical da partícula embora haja influência considerável sobre a taxa de circulação sólida das partículas. Quanto aos resultados obtidos pela simulação do DEM-CFD, estes forneceram uma boa previsão quanto ao perfil da velocidade vertical das partículas ao longo da linha central do leito, principalmente no estágio de aceleração rápida no bico inferior.

Salikov et al. (2015) verificaram a estabilidade em um leito de jorro que possuía geometria retangular. A mesma foi caracterizada pela análise da queda de pressão e simetria de fluxo. Para diferentes tipos de partículas e taxas de fluxo de ar, foram estudados diferentes efeitos de condições geométricas, como o desenho de entrada e ângulo prismático.

As partículas utilizadas foram de óxido de alumínio ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ), polipropileno e partículas de vidro. As partículas de  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  possuíam diâmetro de 1,77 mm e 0,65 mm, densidade de  $1,04 \text{ g/cm}^3$ , esfericidade de 0,98 e 0,97 e classificação de Geldart tipos D e B respectivamente. As partículas de polipropileno e partículas de vidro possuíam tamanhos de 1,57 mm e 4,40 mm, densidade de  $2,5 \text{ g/cm}^3$  e  $0,91 \text{ g/cm}^3$ , esfericidade de 0,98 e 0,93, respectivamente, e classificação de Geldart tipo D.

O material utilizado para o leito foi o policarbonato. O leito estudado possuía as seguintes dimensões: largura ( $\alpha$ ) – 0,25 m; profundidade ( $\beta$ ) – 0,1 m; ângulo prismático ( $\theta$ ) variável entre  $40^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $80^\circ$ . As fendas possuíam altura de 1,0 a 3,5 mm e a altura da borda ( $H_c$ ) tinha dependência do ângulo prismático. O equipamento está ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Configuração do equipamento ajustável utilizado por Salikov et al. (2015)



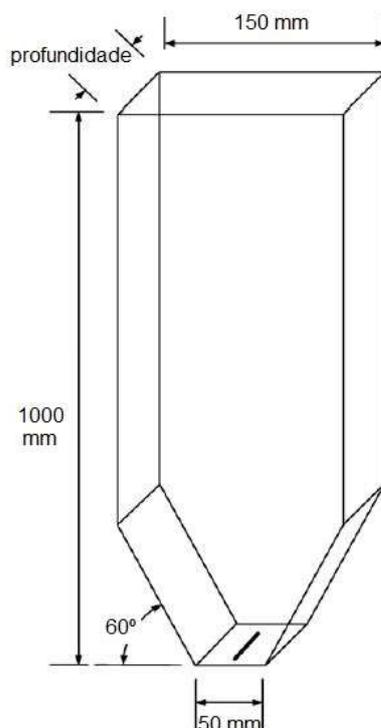
(a) Desenho do leito de jorro projetado. (b) Fluxograma da configuração utilizada (1-leito de jorro; 2-anemômetro; 3-ventilador; 4-detector de pressão de alta velocidade; 5-conversor análogo ao digital; 6-conversor de frequência, 7-computador; 8-câmera de vídeo de alta velocidade). (c) Projeto da entrada e formas do perfil central (1-original afiado; 2-alisado)

A finalidade deste trabalho foi investigar a estabilidade do jato de um leito de jorro retangular com uma configuração que é amplamente utilizada na indústria. Então, pode-se propor uma otimização deste tipo de leito. Os autores verificaram que o ângulo prismático teve um forte impacto nas características do jorro, além de ser alcançada a estabilidade do jorro independentemente da velocidade do gás. A melhor configuração encontrada foi para um ângulo prismático de  $80^\circ$ .

Qiu et al. (2015) estudaram o fluxo gás-sólido em um leito de jorro retangular 3-D e *quasi* 3-D com os mesmos parâmetros de geometria, exceto profundidade, por meio de simulação computacional CFD-DEM com o objetivo de explorar o efeito da profundidade sobre a fluidodinâmica do leito.

As dimensões definidas e utilizadas estão ilustradas na Figura 16.

**Figura 16 – Diagrama esquemático do leito de jorro bidimensional utilizado por Qiu et al. (2015)**



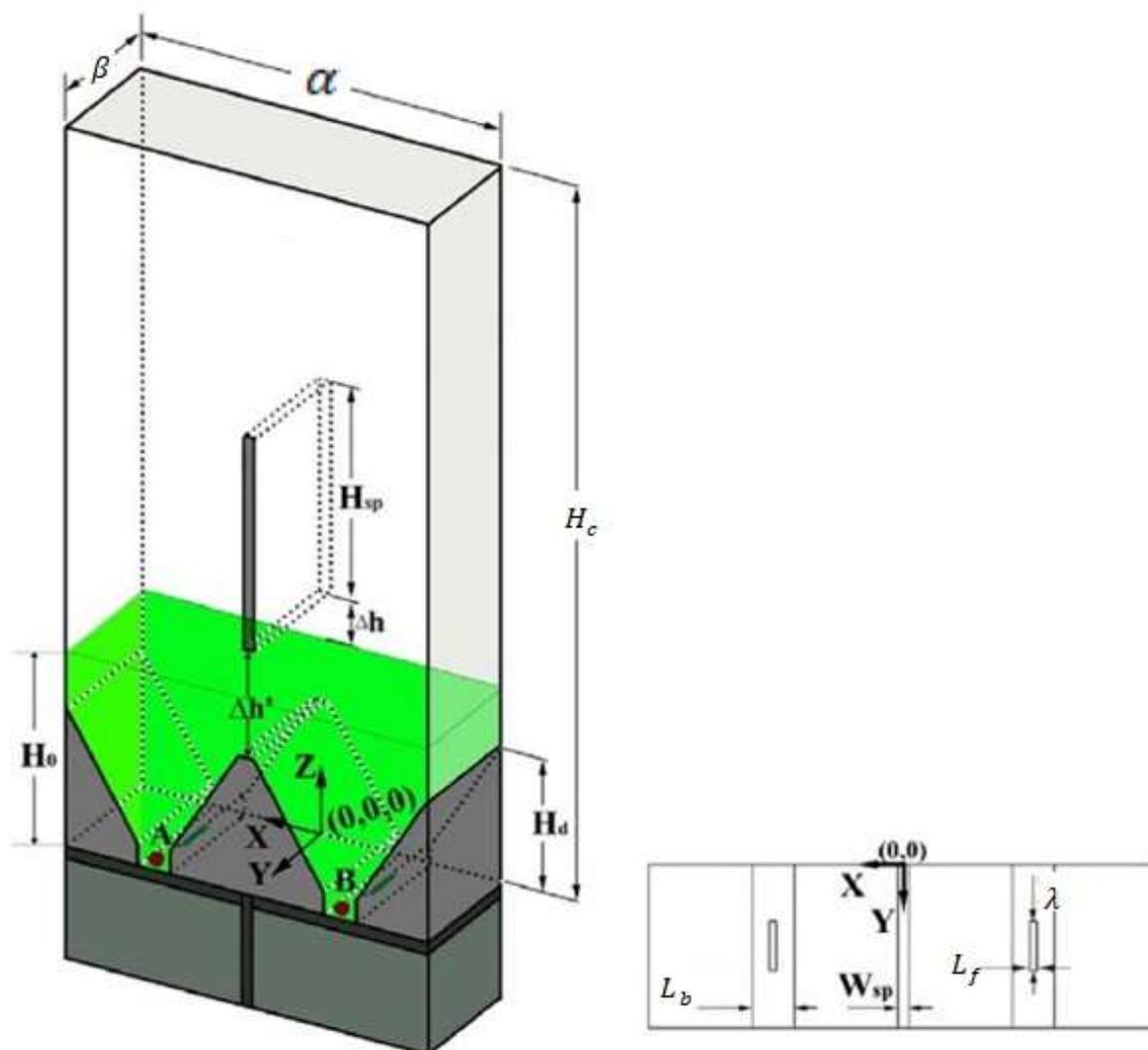
Fonte: Qiu et al. (2015)

As propriedades das partículas utilizadas tinham diâmetro de 1,33 mm, densidade de  $2490 \text{ kg/m}^3$ , coeficiente restituição da parede de 0,97, coeficiente de restituição de interpartículas de 0,97 e coeficiente de fricção de interpartículas de 0,3.

Foi possível então, comparar os principais parâmetros que influenciam e suas diferenças entre as duas geometrias estudadas (3-D e *quasi* 3-D). Foi observado que, no leito 3-D, com o aumento da profundidade do leito, a velocidade de mínimo jorro e a queda de pressão máxima diminuem até um certo momento onde permanecem constante. Também observou-se que, no leito *quasi* 3-D, embora uma alta velocidade superficial seja dada, não ocorre a formação de um jorro constante como ocorre no leito 3-D.

Wang et al. (2016) avaliaram em um leito de jorro retangular duplo, a transferência de sólidos entre duas câmaras, os efeitos da posição da partição, a velocidade superficial do gás, altura do leito fixo e da divisão na mistura de sólidos. O leito estudado está ilustrado na Figura 17.

Figura 17 – Esquema geral e vista de topo do leito de jorro bidimensional utilizado por Wang et al. (2016)



Fonte: Wang et al. (2016)

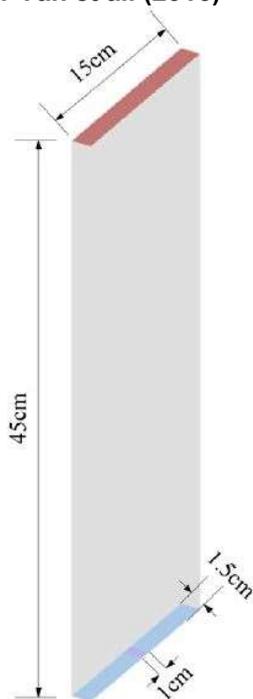
As dimensões do leito utilizadas foram:  $H_c = 0,8$  m,  $\lambda = 0,3$  m,  $L_b = 0,0254$  m e  $H_d = 0,012$  m. As dimensões das partículas traçadoras vermelhas tinham diâmetros de 1,16; 1,61 e 2,85 mm, densidade de  $2530 \text{ kg/m}^3$ , esfericidade de 1,0 e ângulo de repouso de  $22,0$ ;  $20,4$  e  $22,8^\circ$ . Já as das partículas traçadoras pretas possuíam as mesmas dimensões com relação ao diâmetro, densidade e esfericidade, diferenciando apenas no ângulo de repouso que era de  $19,9$ ;  $21,8$  e  $23,3^\circ$ .

Ao final, foi constatado que a transferência de sólidos entre as câmaras foi fortemente influenciada pela posição da partição e pela velocidade superficial do gás, já a altura do leito fixo teve apenas um pequeno efeito no comportamento da mistura estudada. Concluiu-se que uma partição mais curta ajuda a promover a transferência de sólidos entre as câmaras.

Yan et al. (2016) estudaram a simulação de um leito de jorro retangular no *software* OpenFOAM e em seguida, o leito foi testado experimentalmente para verificar se as previsões estariam em conformidade com os resultados experimentais.

As dimensões do leito estudado estão presentes na Figura 18.

**Figura 18 – Dimensionamento do leito utilizado por Yan et al. (2016)**



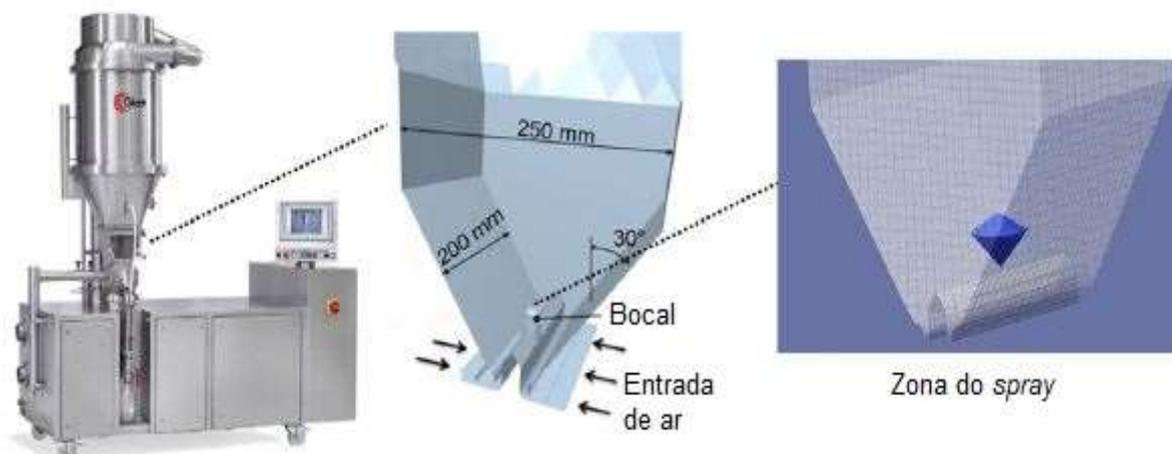
**Fonte: Yan et al. (2016)**

Ao final, pode-se concluir que o *software* utilizado com base no OpenFOAM tem sua confiabilidade comprovada por comparação com experimentos. Foram detectadas as zonas de respingo e do leito denso, e também o *loop* de circulação de partículas. Além disso, o gás de combustão e de síntese puderam ser bem separados.

Pietsch et al. (2016) investigaram a fluidodinâmica de um sistema gás-sólido em um leito de jorro tridimensional retangular com duas entradas horizontais de gás por meio de experimentos e simulações CFD-DEM. Foram analisados diferentes modelos de arrasto.

As dimensões e o esquema do equipamento simulado estão presentes na Figura 19.

**Figura 19 – Planta laboratorial, geometria da câmara de processo e zona de *spray* em *mesh* da simulação realizada por Pietsch (2016)**



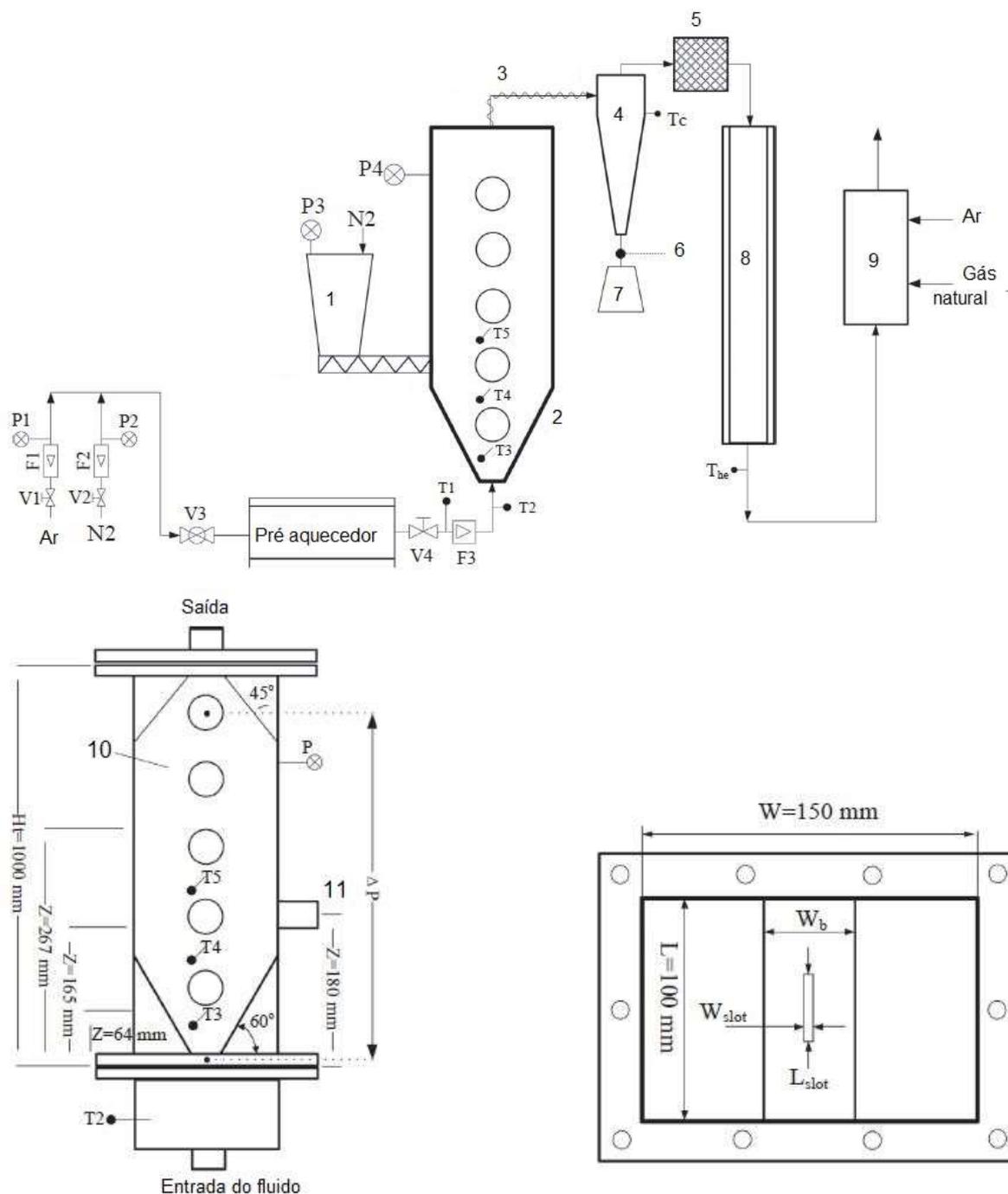
**Fonte: Pietsch (2016)**

Foram utilizadas partículas esféricas de  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  que possuíam de  $656\ \mu\text{m}$ .

Ao final verificou-se que os modelos de arrasto de Koch, Hill e Beetstra são os que preveem a expansão correta do leito, e a simulação do comportamento de jorro mostrou-se muito similar ao experimental. Também foi possível observar que a estabilidade do jorro e a uniformidade no transporte das partículas através da zona de pulverização obteve considerável melhora com a instalação de dois tubos *draft* paralelos na câmara de processo. Desta forma, os tubos *draft* aparentam ser uma ferramenta promissora para um processo com injeção líquida com a finalidade de alcançar uma distribuição homogênea no recobrimento de partículas.

Wang et al. (2017) estudaram os efeitos da temperatura e do tamanho de partículas na torrefação de biomassa em um reator de leito de jorro retangular. As partículas de serragem de diferentes tamanhos foram torrefadas em um reator retangular contínuo. O reator de torrefação de leito retangular (Figura 20) é feito de aço carbono, medindo  $150 \times 100\ \text{mm}$  em sua seção transversal interna e  $1,0\ \text{m}$  de altura, com base divergente de ângulo de inclinação de  $60^\circ$ . O comprimento foi de  $30\ \text{mm}$  e a largura de  $4\ \text{mm}$ . A largura da base media  $25,4\ \text{mm}$ . Foram instaladas cinco paredes de quartzo de diâmetro de  $50,8\ \text{mm}$  na parede frontal para observar o movimento dos sólidos e a mudança no reator.

Figura 20 – Esquema do leito de jorro bidimensional e da configuração do equipamento utilizado por Wang et al. (2017)



F1, F2-Rotâmetros; F3-medidor de fluxo com orifício; P-calibrador de pressão; T-termopar; V1,V2-válvulas agulha; V3-válvula de esfera; V4-válvula globo. 1-alimentador; 2-reator SRSB; 3-fita de aquecimento; 4-ciclone; 5-filtro; 6-porta de amostragem de sólidos; 7-funil; 8-trocador de calor; 9-pós combustor; 10-janela de quartzo; 11-porta de alimentação.

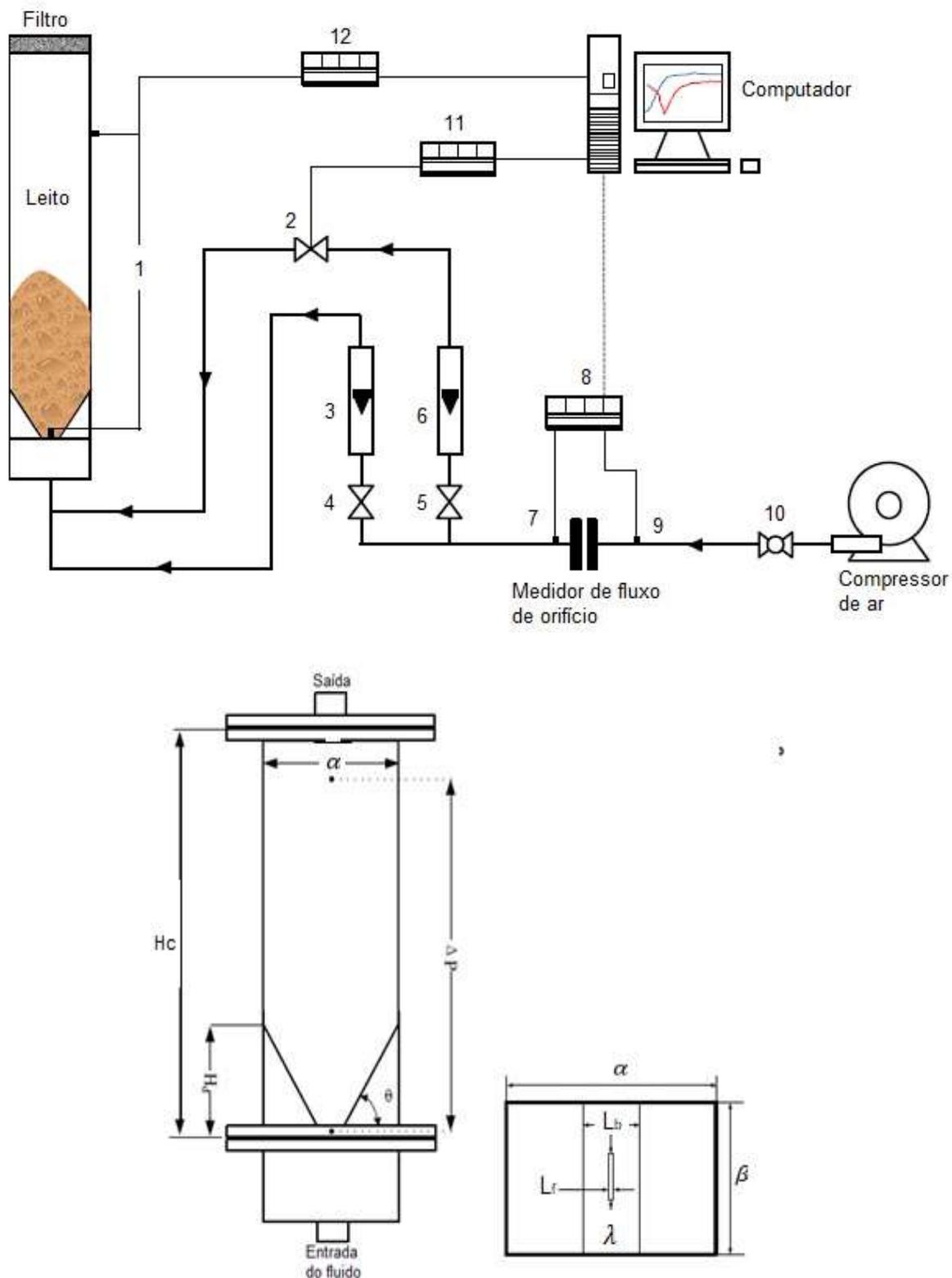
Fonte: Wang et al. (2017)

Foram analisados os efeitos do tamanho e da temperatura das partículas nas propriedades do produto torrefado, como análises próximas, análise final, HHV densidade e rendimento energético. A temperatura foi a variável mais importante no processo de torrefação. Notou-se também que a temperatura foi a variável de maior

importância no processo. O aumento do tamanho da partícula levou a uma maior perda de serragem e aumento de massa do produto torrefado que permaneceu no reator. A redução do conteúdo de cinzas em diâmetro de Sauter significa que o tamanho de partículas foi de 20,3 e 28,2% para 0,25 – 0,5 mm, respectivamente.

Parise et al. (2017) avaliaram o funcionamento de um leito de jorro retangular com fenda com a utilização de fluxo de ar pulsado com diferentes frequências e altura do leito fixo. Foram utilizadas partículas de painço, que possuem diâmetro médio de 1,25 mm e densidade de  $1331 \text{ kg/m}^3$ . O leito utilizado possuía seção transversal com dimensões 0,15 x 0,10 m, altura de 1,6 m e seção divergente com ângulo de  $60^\circ$ . O esquema do leito de jorro retangular com fenda e configuração do equipamento utilizado encontra-se na Figura 21.

Figura 21 – Esquema do leito de jorro retangular com fenda e da configuração do equipamento utilizado por Parise et al. (2017)



1,7,9-Transdutores de pressão; 2,4,5-válvulas agulha; 3,6-rotômetros; 8,11,12-sistema de aquisição de dados; 10-controlador de pressão.  
Fonte: Parise et al. (2017)

Foram analisadas nove alturas de leito fixo e dois fluxos de gás diferentes, onde um deles mantinha o fluxo constante, enquanto o outro injetava ar em pulsos com frequências de 1,0 a 5,0 Hz. Como resultado, foi observado que, para todas as alturas de leito fixo, quando a vazão volumétrica de pulsação é constante necessita-se de um menor fluxo de ar para alcançar-se o jorro. O contato gás-sólido foi melhor a uma frequência de 5,0 Hz, porém, com a vazão volumétrica de pulsação mais alta, a velocidade média total do gás foi independente da frequência de pulsação. A altura da fonte diminuiu significativamente com o aumento da frequência de pulsação.

Embora no Brasil a geometria mais utilizada seja a do tipo cone-cilíndrico, no presente trabalho optou-se por selecionar um tipo de leito de jorro retangular com fenda. Este tipo de geometria vem sendo amplamente estudado, principalmente em simulações fluidodinâmicas, por facilitar o *scale-up* e proporcionar melhor eficiência.

## 2.6 CORRELAÇÕES DA LITERATURA PARA OBTENÇÃO DA VELOCIDADE DE MÍNIMO JORRO E QUEDA DE PRESSÃO MÁXIMA EM LEITO DE JORRO RETANGULAR

Na seção 2.6 será abordado como Chen (2008) encontrou a correlação por meio de regressão empírica para a obtenção da velocidade de mínimo jorro e da queda máxima de pressão em leito de jorro retangular.

Chen (2008) investigou a performance de leitos de jorro retangulares com diferentes dimensões, foram usadas quatro diferentes colunas de acrílico, nomeadas de A a D. A coluna A, a mesma definida por Dogan et al. (2000) e Freitas et al. (2000), foi utilizada como protótipo para análise de *scale-up*. As demais colunas foram confeccionadas com formas geométricas similares com a coluna A, sendo suas respectivas dimensões apresentadas na Tabela 1 a seguir:

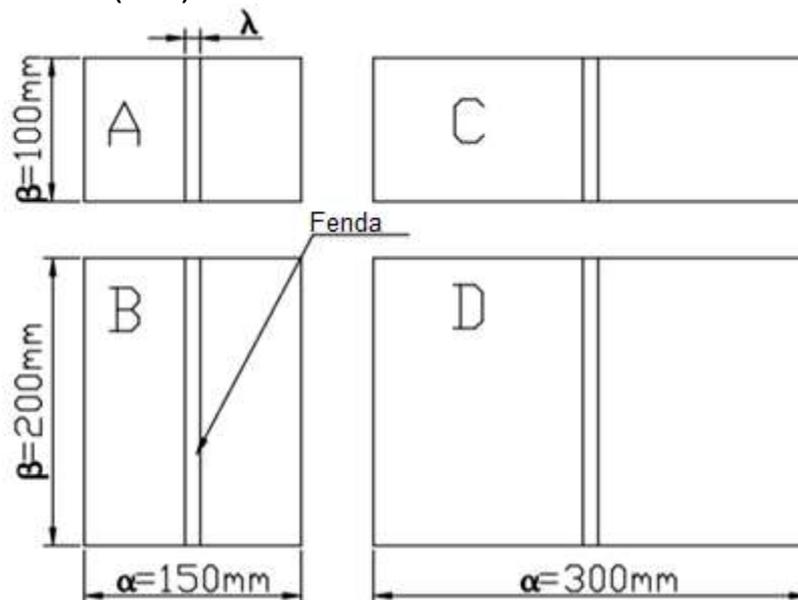
**Tabela 1 – Dimensões das colunas retangulares analisadas por Chen (2008)**

Coluna	A	B	C	D
Largura, $\alpha$ (mm)	150	150	300	300
Espessura, $\beta$ (mm)	100	200	100	200
Altura, $H_c$ (mm)	800	1000	1000	1000

Fonte: Chen (2008)

Na Figura 22, está representada uma vista superior esquemática das colunas. Elas são formadas por quatro partes principais: coluna retangular de 300 x 100 mm, câmara de ar com 250 mm de altura, uma secção inferior divergente e uma fenda.

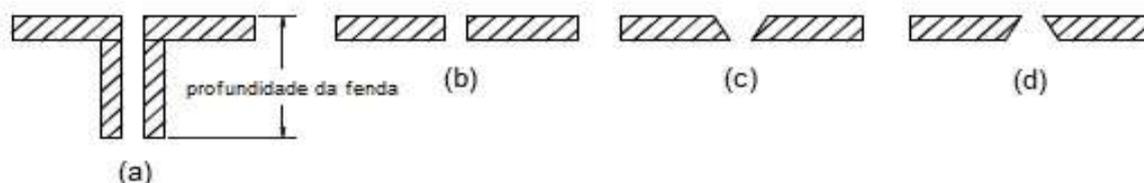
**Figura 22 – Figura esquemática das colunas A, B, C e D estudadas por Chen (2008)**



Fonte: Adaptado de Chen (2008)

Quanto à dimensão e configuração da fenda, Chen (2008) analisou 4 tipos diferentes de fenda (Figura 23).

**Figura 23 – Diferentes tipos de fenda analisados por Chen (2008)**



(a) Fenda normal estendida; (b) Fenda padrão retangular; (c) Fenda divergente curta; (d) Fenda convergente curta.

Fonte: Adaptado de Chen (2008)

Fendas retangulares padrão (Figura 23(b)) foram utilizados em muitos trabalhos já citados, como (Dogan et al., 2000, 2004; Freitas et al., 2000; Kalwar et al., 1989, 1992, 1993; Passos et al., 1991, 1993, 1994) em leitos de jorro com fenda retangular. Sendo assim, a fim de comparação de resultados, Chen (2008) realizou experimentos a fim de se testar a influência de cada parâmetro.

Chen (2008) também avaliou a largura da coluna ( $\alpha$ ), espessura da coluna ( $\beta$ ), largura da fenda ( $\lambda$ ), diâmetro médio das partículas ( $d_p$ ), densidade do sólido ( $\rho_s$ ) e altura do leito fixo ( $H_s$ ). Foram representados esses fatores pelos efeitos dos parâmetros  $\alpha/\beta$ ,  $\alpha/\lambda$ ,  $\lambda/d_p$ . Constatou-se que a velocidade de mínimo jorro foi superior à medida que se aumentou a altura do leito fixo, conforme já previsto nos estudos de (Dogan et al., 2000, 2004). Tal resultado também ocorreu com o aumento da largura da fenda. Os resultados estabelecidos entre tamanho de partículas e velocidade de mínimo jorro foram proporcionais.

A velocidade de mínimo jorro aumentou com uma maior proporção da coluna  $\alpha/\beta$ , o que pode ser justificado pelo fato de que, com menor proporção, mais gás consegue adentrar no anel. Com relação à proporção  $\alpha/\lambda$ , à medida que esta aumentou, diminuiu-se a velocidade de mínimo jorro, pois quanto maior esta razão, maior a velocidade de entrada e maior momento para uma certa velocidade superficial de gás. Com relação a  $\lambda/d_p$ , a velocidade de jorro mostrou-se inversamente proporcional. Mas quanto maior foi a relação entre  $H_s/d_p$ , maior também era a velocidade de mínimo jorro (CHEN, 2008).

Com relação ao comprimento da fenda, todas possuíam comprimento padrão e iguais para a espessura da coluna. Todas as aberturas possuíam a mesma largura de 4 mm, mas possuíam diferentes comprimentos de 40, 60, 80 e 100 mm. O jato menos instável foi para o comprimento de 80 mm e o mais estável de 60 mm. Para 100 mm, havia condições instáveis como *slugging* ou fluidização parcial. Já a fenda mais curta (40 mm) causou menores velocidade de mínimo jorro e queda de pressão. Desta forma, observou-se que, com uma fenda mais curta, o gás entra por meio de uma área menor, facilitando o jorro (CHEN, 2008).

Pode-se concluir então que, quanto mais curta ou mais estreita, maior a velocidade de gás na saída da fenda e fendas de maior comprimento causam maiores variações de velocidade ao longo da sua entrada, com isso, o fluxo torna-se mais instável.

Sobre a relação comprimento/largura, fendas com tal relação superior a 1 possuem um maior perímetro, fornecendo assim maior área de contato do gás com partículas. Já com relação à profundidade, que é a altura do canal da entrada até a saída, mantida a largura igual de 4 mm para os testes e comprimento igual à espessura da coluna, resultados sugerem que os profundidades menores mostram levemente uma maior queda de pressão (CHEN, 2008).

Observou-se que a configuração das fendas tem influência significativa na estabilidade dos leitos de jorro. A queda de pressão e a velocidade de mínimo jorro possuem pouca relação com a largura da fenda e diâmetro de partículas. A relação de queda de pressão do jorro para queda de pressão de fluidização deve ter uma relação inferior a 0,75. Para melhorar a estabilidade dos leitos retangulares com fenda, maior profundidade, menor largura, menor comprimento e menor comprimento/largura, forneceu fluxo mais estável. Uma base divergente e um ângulo de 60° é uma escolha apropriada para tal leito. As velocidades das partículas foram maiores nas fendas com relações de comprimento/largura menores. Uma fenda de maior comprimento/largura proporcionou maior fluxo de partículas (CHEN, 2008).

Por meio de revisão bibliográfica, Chen (2008) agregou as informações obtidas anteriormente para correlações e critérios para os cálculos de velocidade de mínimo jorro, altura máxima e queda de pressão máxima para leitos de jorro retangular. Essas informações estão apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2 – Correlações e critérios para leitos de jorro retangular**

(continua)

Autor	Correlações	
Kalwar et al. (1989)	$\frac{\alpha}{\lambda} = 6 a 20$	(1)
Passos et al. (1993)	$\frac{H_{m\acute{a}x}}{\alpha} = \frac{c_0}{A_{2D}} + c_2 + \frac{c_3}{A_{2D}^2}$	(2)
	$\frac{\beta}{\lambda} < 650 \left( \frac{d_p \phi}{\lambda} \right)^2$	(3)
	Onde $c_i$ é uma constante, tem-se então: $\frac{\sqrt{\beta \lambda}}{d_p} < 25,4$	(4)
Rocha et al. (1995)	$\frac{\Delta P_{m\acute{a}x}}{Hg\rho_p} = 1 + 0,006 \left( \frac{D_c}{D_i} \right)^{5,04} \left( \frac{d_p}{D_c \phi} - 1 \right)^{-1,92} \left( \tan \left( \frac{\gamma}{2} \right) \right)^{0,7}$	(5)
	$Q_{ms} = 5,92 \cdot 10^{-5} \left( \frac{d_p}{D_c \phi} \right)^{0,05} \left( \frac{D_i}{D_c} \right)^{0,26} \left( \tan \left( \frac{\gamma}{2} \right) \right)^{0,7} \left( \frac{2gH_s(\rho_p - \rho_g)}{\rho_g} \right)$	(6)
Dogan et al. (2000)	$U_{ms} \propto H_s^c$	(7)
	Onde $c = 0,57 a 1,07$ $\frac{\lambda}{d_p} < 25,4$	(8)
Huang e Chyang (1992)	$\frac{H_{s,m\acute{a}x}}{D_i} \propto \frac{P^c}{D_i}$	(9)
Costa e Taranto (2003)	$\frac{U_{ms}}{\sqrt{2gH_s}} = 3 \left( \frac{\alpha}{\lambda} \right) \left( \frac{\alpha}{d_p \phi} \right)^{-0,75} \left( \frac{H_s}{\alpha} \right)^{0,16} \left( \frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} \right)^{0,23}$	(10)
	$\frac{\Delta P_{m\acute{a}x}}{Hg\rho_p} = 1 + 32,6 \left( \frac{\alpha}{\lambda} \right)^{0,05} \left( \frac{\alpha}{d_p \phi} \right)^{0,18} \left( \frac{H}{\alpha} \right)^{1,15} (Ar(\phi))^{-0,41} \left( \tan \left( \frac{\gamma}{2} \right) \right)^{-2}$	(11)

Tabela 2 – Correlações e critérios para leitos de jorro retangular

		(conclusão)
	$\frac{H_{m\acute{a}x}}{\alpha} = 39,47 \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^{0,075} \left(\frac{\alpha}{d_p \phi}\right)^{0,18} \left(\frac{H}{\alpha}\right)^{-0,145} \left(\tan\left(\frac{\gamma}{2}\right)\right)^{0,69}$	(12)

Fonte: Chen (2008)

Cada autor citado na Tabela 2 utilizou uma correlação específica, como por exemplo Kalwar et. al (1989) que estudaram experimentalmente a tensão de compressão da partícula em função de uma relação de raio e ângulo, determinando um ângulo de 30° como ideal. Passos et al. (1993) determinaram critérios para o leito de jorro a fim de propor uma correlação para altura máxima do leito de jorro em leito de jorro retangular. Rocha et al. (1995) propuseram uma dinâmica e transferência de calor durante o revestimento de comprimidos em um leito de jorro bidimensional. Dogan et al (2000) determinaram oito regimes de escoamento em um leito de jorro de 30 mm. Huang e Chyang (1992) investigaram regimes de escoamento em regimes de escoamento múltiplos. Por fim, Costa e Taranto (2003) propuseram critérios para o escalonamento de leitos bidimensionais em que foram analisadas similaridade geométrica e também foi possível fornecer algumas correlações de parâmetros não dimensionais em leitos de jorro convencionais.

### 2.6.1 Velocidade de Mínimo Jorro

Em leitos de jorro retangular com fenda, a velocidade de mínimo jorro pode ser influenciada por diversos fatores, como dimensões da coluna e da fenda.

Chen (2008), por meio de regressão empírica a partir de todos os dados disponíveis e dos resultados obtidos em seus estudos, que podem ser verificados na Tabela 2, obteve a seguinte correlação para o cálculo da velocidade de mínimo jorro em leitos com qualquer configuração de fenda:

$$\frac{U_{ms}}{\sqrt{gH_s}} = 0,0743 \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^{0,418} \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^{-1,18} \left(\frac{\lambda}{d_p}\right)^{-0,996} \left(\frac{H_s}{d_p}\right)^{0,192} \left(\frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g}\right)^{0,847} \quad (13)$$

De maneira análoga, Chen (2008) obteve, para leitos com fenda retangular padrão (Figura 22(b)) a seguinte correlação:

$$\frac{U_{ms}}{\sqrt{gH_s}} = 0,256 \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^{0,34} \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^{-1,09} \left(\frac{\lambda}{d_p}\right)^{-0,898} \left(\frac{H_s}{d_p}\right)^{0,276} \left(\frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g}\right)^{0,598} \quad (14)$$

### 2.6.2 Queda de Pressão Máxima no Leito

Conforme os resultados obtidos por Chen (2008), a queda de pressão medida aumentou à medida que aumentava a altura do leito fixo e isto foi maior para fendas mais largas, pois o gás emergente se espalhou mais amplamente. Também constatou que a queda de pressão no leito aumentou com o aumento da altura do leito e da largura da fenda. Da mesma maneira que previam os resultados de Dogan et. al (2000), o diâmetro das partículas teve apenas uma pequena influência na queda de pressão.

De forma análoga ao que se encontrou a correlação para a velocidade de mínimo jorro, também foi possível encontrar para a queda máxima de pressão na coluna para leitos com fendas do tipo (b).

$$\frac{\Delta P_{max}}{g(\rho_s - \rho_g)H_s} = 2630 \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^{-0,174} \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^{-0,561} \left(\frac{\lambda}{d_p}\right)^{0,196} \left(\frac{H_s}{d_p}\right)^{-0,207} \left(\frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g}\right)^{-0,770} \quad (15)$$

### 3 METODOLOGIA

No presente trabalho, a fim de se estabelecer as dimensões para a seleção do sistema leito de jorro retangular com fenda, revisou-se estudos sobre os tipos de leito com geometria cilíndrica e retangular. Pode-se obter a velocidade de mínimo jorro e a queda máxima de pressão no leito. Neste item, calculou-se toda a perda de carga na linha a fim de sugerir um tipo adequado de soprador para o sistema de fornecimento de ar. Por fim, realizou-se o desenho completo do leito de jorro proposto.

#### 3.1 SELEÇÃO DE UM SISTEMA LEITO DE JORRO RETANGULAR

Para a escolha do dimensionamento do leito de jorro retangular, utilizou-se como referência principal o trabalho de Parise et. al. (2017) a fim de dar continuidade ao estudo que foi realizado pelos autores, na Universidade de *British Columbia*, em Vancouver, Canadá.

#### 3.2 MATERIAIS

Para a realização dos cálculos, selecionou-se três tipos de partículas: soja, feijão e esferas de vidro. Foram selecionados esses três tipos de partículas pois abrange-se uma ampla faixa de diâmetro médio (2,18 a 6,66 mm) e densidade da partícula (1336 a 2490 kg/m<sup>3</sup>).

Para a determinação do diâmetro médio, para soja e feijão foi realizada medição manual através de um paquímetro, já para as esferas de vidro foi realizada análise granulométrica com peneiras do tipo Tyler.

Para a determinação da densidade de partículas sólidas realizou-se a prática de Picnometria Líquida, uma técnica precisa, uma vez que o cálculo do volume é obtido por meio da medida de sua massa.

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos para tais partículas utilizadas, assim como a respectiva classificação com base no grupo de Geldart.

**Tabela 3 – Propriedades físicas e grupo de classificação das partículas utilizadas**

Partícula	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Diâmetro médio (mm)	Grupo de Geldart
Soja	1423	5,51	D
Feijão	1336	6,66	D
Esfera de Vidro	2490	2,18	D

Fonte: Autoria Própria

O material utilizado para a posterior construção do leito de jorro será chapa de policarbonato compacto, com espessura de 10 mm.

### 3.3 CÁLCULO DAS PROPRIEDADES UTILIZADAS EM LEITO DE JORRO

Para o cálculo da velocidade de mínimo jorro foi utilizada a correlação encontrada por Chen (2008), apresentada na seção 2.6.1, que é utilizada para a fenda do tipo (b), pois foi o tipo de fenda selecionada para o leito de jorro proposto, e é representada pela Equação (16) a seguir:

$$\frac{U_{ms}}{\sqrt{gH_s}} = 0,256 \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^{0,34} \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^{-1,09} \left(\frac{\lambda}{d_p}\right)^{-0,898} \left(\frac{H_s}{d_p}\right)^{0,276} \left(\frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g}\right)^{0,598} \quad (16)$$

Para fins de comparação, calculou-se também a velocidade de mínimo jorro através da Equação (17) a seguir, também disposta na seção 2.6.1, que pode ser utilizada para qualquer configuração de fenda:

$$\frac{U_{ms}}{\sqrt{gH_s}} = 0,0743 \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^{0,418} \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^{-1,18} \left(\frac{\lambda}{d_p}\right)^{-0,996} \left(\frac{H_s}{d_p}\right)^{0,192} \left(\frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g}\right)^{0,847} \quad (17)$$

Para encontrar o valor da queda máxima de pressão na coluna, apresentada na seção 2.6.2, utilizou-se a Equação (18).

$$\frac{\Delta P_{max}}{g(\rho_s - \rho_g)H_s} = 2630 \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^{-0,174} \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^{-0,561} \left(\frac{\lambda}{d_p}\right)^{0,196} \left(\frac{H_s}{d_p}\right)^{-0,207} \left(\frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g}\right)^{-0,770} \quad (18)$$

### 3.4 INSTRUMENTAÇÃO

A instrumentação necessária para o sistema de leito de jorro proposto consiste em:

- Medidores de pressão: serão utilizados transdutores de pressão conectados à um sistema de aquisição e processamento de sinais;
- Medidores de temperatura: serão utilizados termopares e termorresistores do tipo PT-100;
- Medidor de vazão de ar para a fluidização: será utilizado medidor do tipo placa de orifício (com obtenção da vazão mássica a partir das Normas ASME MFC-14M-2003, conforme Apêndice A).

### 3.5 SISTEMA DE FORNECIMENTO DE AR

A fim de se sugerir um modelo de soprador adequado para o sistema em questão, se fez necessário calcular a potência nominal requerida pelo mesmo. Primeiramente, calculou-se a perda de carga na linha do sistema de leito de jorro.

A perda de carga ( $h_L$ ) representa a altura adicional à qual o fluido precisa ser elevado por uma bomba para superar as perdas por atrito do tubo, ela é causada pela viscosidade e está relacionada diretamente à tensão de cisalhamento na parede (ÇENGEL, 2006).

A perda de carga pode ser determinada pela Equação de Bernoulli. Esta equação é uma relação aproximada entre pressão, velocidade e elevação e é válida para regiões de escoamento incompressíveis e em regime permanente. Combinando as equações da energia e da continuidade é possível obter Equação de Bernoulli, a qual é obtida a partir da Equação de Energia e que nos fornece a perda de carga para as tubulações: (ÇENGEL, 2006)

Considerando o tubo na horizontal e sem variação da velocidade, pois possui diâmetro constante, temos: (ÇENGEL, 2006)

$$h_L = \frac{\Delta P_L}{\rho \cdot g} \quad (19)$$

Esta perda também pode ser expressa pelo *Diagrama de Moody*, denotado pela seguinte Equação:

$$h_L = \frac{\Delta P_L}{\rho \cdot g} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V_{méd}^2}{2 \cdot g} \quad (20)$$

Em que  $f$  é o fator de atrito de Darcy, que pode ser obtido através do diagrama de Moody .

O fluido, em um sistema típico de tubulações, passa através de diversas conexões, válvulas, curvas, cotovelos, tês, entradas, saídas, extensões e reduções além dos tubos. Tais componentes interrompem o escoamento suave do fluido, causando perdas adicionais de carga devido à separação do escoamento e à mistura que eles induzem. Para isso é necessário que seja calculada a perda de carga provocada por esses acessórios (ÇENGEL, 2006).

As perdas menores podem ser expressas em termos do coeficiente de perda ( $K_L$ ), que também pode ser chamado de coeficiente de resistência, definido por: (ÇENGEL, 2006)

$$K_L = \frac{h_{L,menor}}{V^2/2.g} \quad (21)$$

Sendo  $h_{La}$  é a perda de carga irreversível adicional no sistema de tubulação causada pela inserção do componente.

Assim que todos coeficientes de perda de carga são determinados, é possível calcular a perda total ( $h_{L,total}$ ) de um sistema de tubos: (ÇENGEL, 2006)

$$h_{L,total} = h_L + h_{L,m} \quad (22)$$

Logo:

$$h_{L,total} = \sum_i f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V_{méd}^2}{2.g} + \sum_j K_L \frac{V^2}{2g} \quad (23)$$

No presente trabalho, selecionou-se como sistema de fornecimento de ar, um soprador, pois segundo Çengel (2006), soprador é um tipo de ventilador que possui elevação de pressão e vazão de moderadas a altas.

Segundo Bazzo (1995), a potência do soprador necessária para vencer a parcela da perda de carga pode ser calculada pela Equação:

$$N = \frac{\Delta P_v \cdot m_g}{\eta \cdot \rho_g} \quad (24)$$

Utiliza-se como rendimento valores entre 0,65 e 0,75 (BAZZO, 1995).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item, será abordado os resultados encontrados com relação as dimensões utilizadas, velocidade de mínimo jorro, queda máxima de pressão no leito, sugestão do soprador para o sistema de fornecimento de ar e o desenho completo do sistema de leito de jorro retangular com fenda.

### 4.1 SELEÇÃO DO LEITO DE JORRO RETANGULAR

Devido às explicações mencionadas anteriormente e com base nos estudos de Parise et al. (2017), pode-se encontrar as condições adequadas para a seleção do sistema de leito de jorro. Para isso, foi escolhido uma configuração do leito que possui as seguintes dimensões, dispostas na Tabela 4.

**Tabela 4 – Dimensões da Coluna.**

<b>Dados da Coluna</b>	<b>Dimensões</b>
<b>Altura Geral – <math>H_t</math> (mm)</b>	1600
<b>Largura - <math>\alpha</math> (mm)</b>	150
<b>Espessura - <math>\beta</math> (mm)</b>	100
<b>Largura da Base – <math>L_b</math> (mm)</b>	25,4
<b>Largura da fenda de entrada de gás - <math>\lambda</math> (mm)</b>	30
<b>Espessura da fenda de entrada de gás – <math>L_f</math> (mm)</b>	4
<b>Altura da base divergente – <math>H_d</math> (mm)</b>	120
<b>Ângulo incluído - <math>\theta</math> (°)</b>	60
<b>Altura do Leito Fixo - <math>H_s</math></b>	150

Fonte: Parise et al. (2017)

### 4.2 VELOCIDADE DE MÍNIMO JORRO

Para determinação da velocidade de mínimo jorro utilizou-se as correlações (16) e (17) que são equações de regressão empírica obtidas por Chen (2008) e derivadas de todos os dados experimentais de Dogan et al. (2000); Freitas et al. (2000); Dogan et al. (2004).

Por meio das equações (16) e (17) e com os dados das Tabelas 3 e 4, calculou-se a velocidade de mínimo jorro para o leito em questão e para as três diferentes partículas. Obteve-se os resultados que se encontram na Tabela 5.

**Tabela 5 – Velocidade de mínimo jorro encontrada para as partículas selecionadas**

Partícula	Velocidade de mínimo jorro $U_{ms}$ (m/s)	
	Fendas de qualquer tipo	Fenda tipo (b)
Soja	1,45	1,50
Feijão	1,60	1,62
Esferas de Vidro	1,10	1,18

Fonte: Autoria Própria

Para o cálculo da velocidade de mínimo jorro foi utilizado o valor para altura do leito fixo igual a 150 mm.

#### 4.3 QUEDA DE PRESSÃO MÁXIMA

Da mesma maneira descrita anteriormente para o cálculo da velocidade de mínimo jorro, calculou-se a queda de pressão máxima na coluna ( $\Delta P_{m\acute{a}x}$ ) para os três tipos de partículas utilizando-se a Equação (18). Os resultados encontram-se na Tabela 6.

**Tabela 6 – Queda de Pressão máxima do leito encontrada para as partículas selecionadas**

Partícula	Queda de Pressão Máxima - $\Delta P_{max}$ (Pa)
Soja	1447
Feijão	1429
Esferas de Vidro	1626

Fonte: Autoria Própria

#### 4.4 SISTEMA DE FORNECIMENTO DE AR

Pode-se calcular a perda de carga da tubulação pela Equação (19), apresentada na seção 3.5. Substituindo os dados das Tabelas abaixo, foi possível encontrar o valor para a perda de carga na tubulação.

**Tabela 7 – Cálculo da perda de carga na tubulação**

D (m)	$A_c$ (m <sup>2</sup> )	$Re_d$	$\epsilon_R$	f	L (m)	$h_L$ (m)
0,508	0,0020	130150	0,0029	0,025	4	1305

Fonte: Autoria Própria

Por meio da Equação (21), obteve-se as perdas de carga menores. Na Tabela 8, encontra-se os valores de perda de carga menor e os coeficientes de perda de carga dos demais acessórios, assim como da expansão, contração, placa de orifício e filtro de mangas.

**Tabela 8 – Coeficiente de perda de carga e perdas de carga menores**

	$K_L$	$h_{L\text{ menor}} \text{ (m)}$
Cotovelo de 90°	<b>0,9</b>	<b>56,33</b>
Expansão	<b>0,6</b>	<b>38,59</b>
Contração	<b>0,4</b>	<b>31,29</b>
Placa de Orifício	-	<b>1146,5</b>
Filtro de Mangas	-	<b>143,3</b>
Contração	<b>0,4</b>	<b>1,5</b>

**Fonte: Autoria Própria**

Para encontrar o valor da perda de carga da placa de orifício e do filtro de mangas, conforme estudos da literatura, considerou-se 80 e 10% da perda de carga total da linha, respectivamente.

Com os cálculos acima, foi possível obter o valor da perda de carga total do sistema, obtendo um valor de 2722,9 m. Logo, é possível determinar a queda de pressão, a qual é definida sendo igual ao valor necessário da perda de carga a ser superado pelo ventilador, resultando em 33024 Pa.

Para a seleção do soprador ideal, foi necessário o cálculo da potência nominal do mesmo. Em posse da Equação (24), já mencionada anteriormente na seção 3.5, e com os dados da Tabela 9 abaixo, calculou-se a potência nominal do soprador.

**Tabela 9 – Cálculo da Potência Nominal**

$N$ (W)	$N$ (cv)	$\dot{m}$ (kg/s)	$\rho_g$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\eta$	$\Delta P_v$ (Pa)	$\Delta P_v$ (mmca)
<b>3700</b>	<b>5,0</b>	<b>0,09</b>	<b>1,184</b>	<b>0,7</b>	<b>33024</b>	<b>3367</b>

**Fonte: Autoria Própria**

A fim de sugerir o modelo de soprador mais adequado para as características particulares deste tipo de sistema de leite de jorro retangular com fenda, utilizou-se o catálogo de sopradores da marca Aero Mack®.

A Tabela 10 mostra os modelos de sopradores do tipo centrífugo e suas características.

**Tabela 10 - Modelos de sopradores centrífugos da marca Aero Mack®**  
**DADOS TÉCNICOS DOS VENTILADORES CENTRÍFUGOS**

MODELO	VAZÃO (m <sup>3</sup> /min)	PRESSÃO (m.m.c.a.)	POTÊNCIA (cv)	VOLTAGEM		PESO (kg)
				Trifásico	Monofásico	
VCE-02	3,7	55	1/6	220/380	110/220	6
VCE-03	5,6	147	0,33	220/380	110/220	12
VCE-3,5	8	147	0,33	220/380	110/220	12
VCE-04	11	235	1,00	220/380		20
VCE-05	16	190	1,50	220/380		27
VCE-06	50	300	5,00	220/380		74
VCE-07	70	345	7,50	220/380		

**DADOS TÉCNICOS DOS VENTILADORES CENTRÍFUGOS ELAM**

MODELO	VAZÃO (m <sup>3</sup> /min)	PRESSÃO (m.m.c.a.)	POTÊNCIA (cv)	VOLTAGEM	NÍVEL RUÍDO	PESO (kg)
VCE-09	44	480	5,00	220/380/440	F=96 A=100	70
VCE-10	62	620	7,50	220/380/440	F=96 A=106	
VCE-11	75	760	15/20	220/380/440	F=96 A=88	
VCE-12	62/94	72/167	3,00/10,00	220/380/440	F=96 A=85	87
VCE-13	90	850	20	220/380/440	-	160

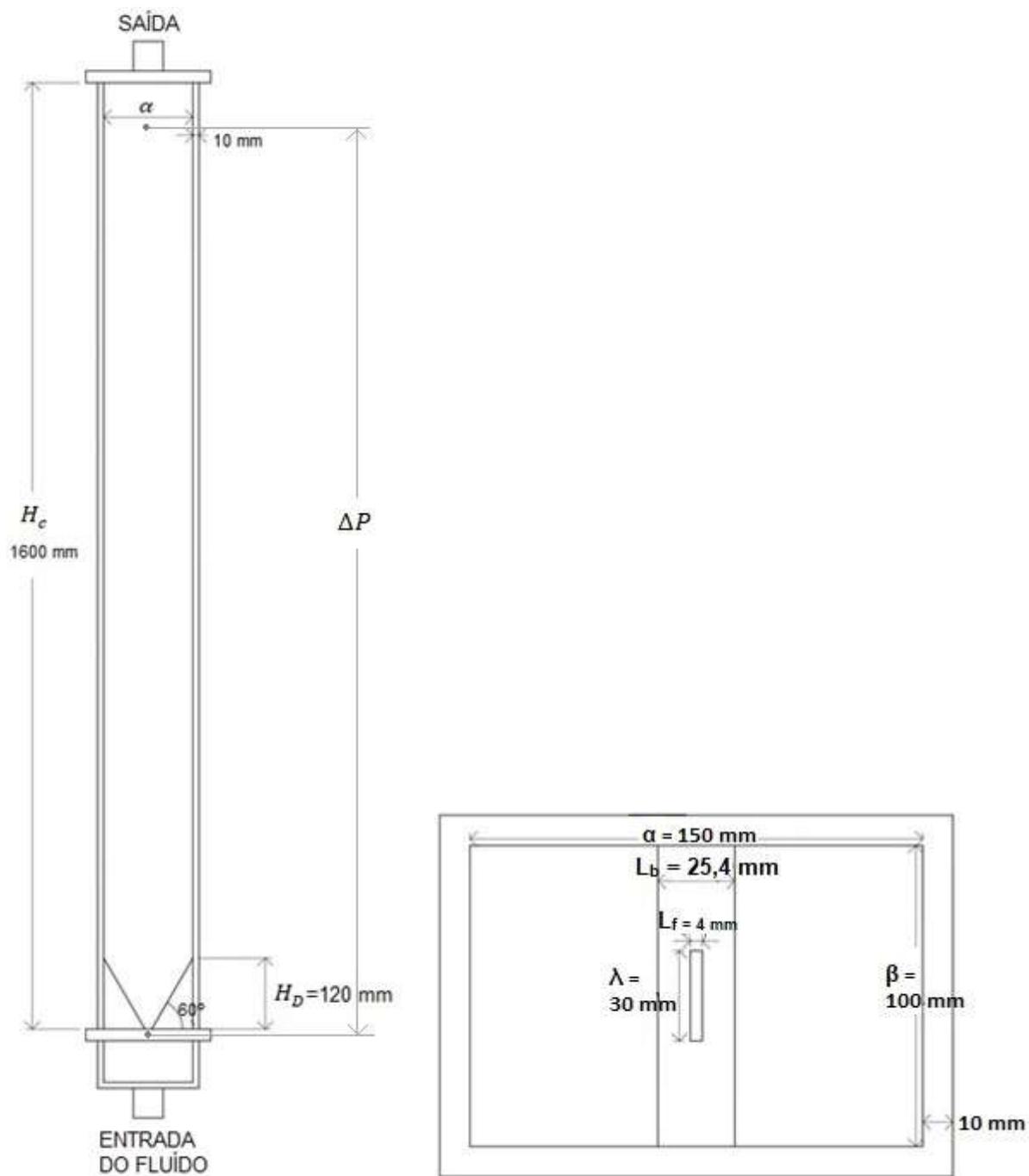
Fonte: Adaptado de Aero Mack® (2018)

Pode-se constatar que o tipo de soprador ideal para as condições estudadas é do tipo centrífugo, da marca Aero Mack, modelo Elam VCE – 10 acoplado a um motor de 7,5 cv.

#### 4.5 DESENHO DO LEITO DE JORRO SELECIONADO

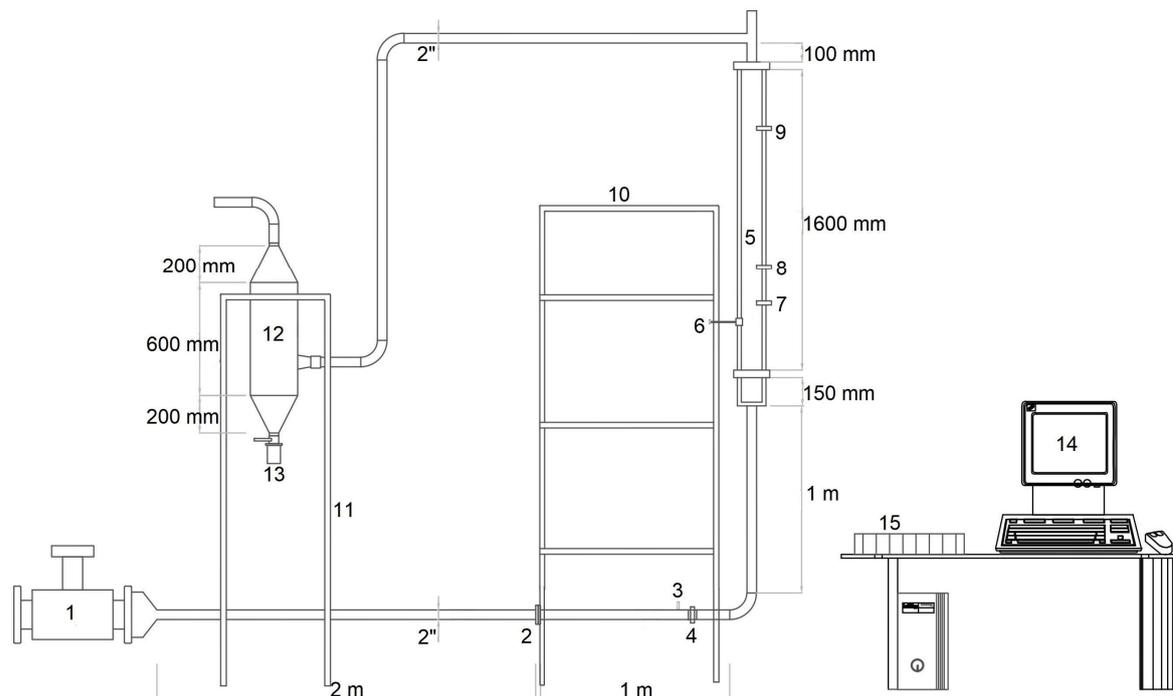
A seguir, mostra-se os desenhos esquemáticos do Leito de Jorro Retangular com Fenda selecionado e do equipamento necessário para a instalação do Leito de Jorro Retangular com fenda selecionado.

Figura 24 – Desenho esquemático do Leito de Jorro Retangular com Fenda selecionado



Fonte: Autoria Própria

**Figura 25 – Esquema do equipamento necessário para instalação do Leito de Jorro Retangular com Fenda Selecionado**



**1-Soprador de ar; 2-placa de orifício; 3-termohigrômetro; 4-resistência elétrica; 5-leito de jorro retangular com fenda; 6-bico atomizador; 7,8,9-sensores de termorresistência; 10,11- suportes para os equipamentos; 12-filtro de mangas; 13-coletor de pó do filtro de mangas; 14-computador; 15-sistema de aquisição de dados.**

**Fonte: Autoria Própria**

## 5 CONCLUSÕES

Neste presente trabalho foi possível, por meio da revisão bibliográfica, fazer um estudo de todo o histórico de aplicação e dimensionamento do Leito de Jorro Retangular com Fenda.

De maneira geral, pode-se concluir que as dimensões tomadas como base de Parise (2017) foram satisfatórias para o objetivo proposto. Também pode-se citar que as correlações propostas por Chen (2008) para o cálculo da velocidade de mínima fluidização e queda de pressão máxima da coluna, são condizentes quando comparadas com o estudo feito pelo autor.

Foi possível selecionar o modelo de soprador ideal para o leito de jorro em questão e fazer o desenho completo do mesmo utilizando um *software* adequado para tal finalidade.

Por fim, conclui-se que o objetivo geral do estudo deste trabalho, estabelecer todos os parâmetros necessários para a seleção do leito de jorro para secagem e posterior construção pelos alunos de engenharia química, foi atingido.

## REFERÊNCIAS

- AMUTIO, M. et al. Fast pyrolysis of eucalyptus waste in a conical spouted. **Bioresource Technology**, v. 194, p.225-232, jul. 2015.
- ASME MFC-14M-2003: **Measurement of Fluid Flow Using Small Bore Precision Orifice Meters**. Isbn: 0791828344: Asme, 2003. 24 p.
- BAZZO, E. **Geração de vapor**. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 1995. 216 p.
- BERTUOL. D. A. et al. Application of spouted bed elutriation in the recycling of lithium ion batteries. **Journal of Power Sources**, v. 275, p. 627-632, nov. 2014.
- BUTZGE, J. J. **Controle do regime fluidodinâmico estável durante o processo de umedecimento de inertes em leito de jorro utilizando análise espectral**. 2012. 152 f. Dissertação (Mestrado - Engenharia de Processos) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2012.
- ÇENGEL, Y.A.; CIMBALA, J.M. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações**. 1. ed. McGrawHill, 2006. 816p.
- CHEN, Z. **Hydrodynamics, Stability and Scale-up of Slot-Rectangular Spouted Beds**. 2008. 282 f. Tese (Doctor of Philosophy) – The Faculty of Graduate Studies, University of British Columbia, Vancouver, 2008.
- CHIELLE. D. P. et al. Spouted bed drying of papaya seeds for oil production. **LWT - Food Science and Technology**, v. 65, p. 852-860, set. 2015.
- COSTA, R. G. et al. Effect of operating conditions on the yield and quality of açai (*Euterpe oleracea* Mart.) powder produced in spouted bed. **LWT - Food Science and Technology**, v. 64, p. 1196-1203, jul. 2015.
- DOGAN, O. M. et al. Hydrodynamics and stability of slot–rectangular spouted beds – part I, Thin bed. **Chemical Engineering Communications**, v.181, p. 225-242, 2000.
- EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. **Spouted and Spout - Fluid Beds**. New York: Cambridge University Press, 2011. 340 p.

GELDART, D. **Gas fluidization technology**. New York: John Wiley & Sons, 1986. 468 p.

GELDART, D. Types of Gas Fluidization. **Powder Technology**, v. 7, p. 285-292, mai. 1973.

LIU, G. Q. Experimental studies of particle flow dynamics in a two-dimensional spouted bed. **Chemical Engineering Science**, v. 63, p. 1131-1141, nov. 2007.

MACINTYRE, A. J. **Ventilação Industrial e Controle de Poluição**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 403 p.

MARTINS, G. Z.; OLIVEIRA, W. P. Utilization of a spouted bed for the application of enteric coating in hard gelatin capsules. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, v. 39, n. 3, jul/set 2003.

MATHUR, K. B.; GISHLER, P. E. A Technique for Contacting Gases With Solids Particles. **AIChE Journal**, v. 1, p. 157 – 164, jun. 1955.

MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. **Spouted beds**. New York: Academic Press, 1974. 304 p.

NASCIMENTO, B. de S. **Análise do Efeito da Composição Química na Secagem de Pasta em Leito de Jorro**. 2013. 133 f. Tese (Doutorado – Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR, São Carlos, 2013.

PARISE M. R. et al. Hydrodynamics of a slot-rectangular spouted bed of biomass particles with simultaneous injection of spouting and pulsating air streams. **Chemical Engineering Journal**, v. 330, p. 82-91, dez. 2017.

PIETSCH, S. et al. CFD-DEM modeling of a three-dimensional prismatic spouted bed. **Powder Technology**, v. 316, p. 245-255, dez. 2016.

QIU, K. et al. Computational evaluation of depth effect on the hydrodynamics of slot-rectangular spouted bed. **Powder Technology**, v. 287, p. 51-60, set. 2015.

ROCHA, A. P. T. et al. Cinética de produção de levedura seca em leito de jorro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.1, p.81-86, 2008.

SALIKOV, V. et al. Investigations on the spouting stability in a prismatic spouted bed and apparatus optimization. **Advanced Powder Technology**, v. 26, p. 718-733, mar. 2015.

SCHAFFKA, F. T. S. **Análise Fluidodinâmica e Térmica do Processo de Secagem de Suspensão Diluída em Leito Fluidizado**. 2017. 149 f. Dissertação (Mestrado – Engenharia Mecânica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Ponta Grossa, 2017.

AEROMACK. **Ventiladores Industriais E Compressores Radiais**. Disponível em: <[http://www.aeromack.com.br/?gclid=CjwKCAiAuMTfBRACeIwAV4SDkZCacJOzHWARJXHzMJKeLWYIXM3uystjQhqpR4Vxj\\_ar2-rxv6llfRoCk2oQAvD\\_BwE](http://www.aeromack.com.br/?gclid=CjwKCAiAuMTfBRACeIwAV4SDkZCacJOzHWARJXHzMJKeLWYIXM3uystjQhqpR4Vxj_ar2-rxv6llfRoCk2oQAvD_BwE)> Acesso em: 18 nov. 2018.

WANG, Z. et al. Effects of temperature and particle size on biomass torrefaction in a slot rectangular spouted bed reactor. **Bioresource Technology**, v. 244, p. 281-288, jul. 2017.

WANG, Z. et al. Solids mixing in a dual-column slot-rectangular spouted bed. **Powder Technology**, v. 301, p. 1264-1269, jul. 2016.

XAVIER, T. P. **Contribuições para a Pirólise da Casca de Macadâmia em Leito de Jorro Cônico**. 2016. 160 f. Tese (Doutorado – Desenvolvimento de Processos Químicos) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Uberlândia, 2016.

YAN, L. et al. Simulation of biomass-steam gasification in fluidized bed reactors: Model setup, comparisons and preliminary predictions. **Bioresource Technology**, v. 221, p. 625-635, set. 2016.

ZANOELO, F. E. **Modelagem e simulação hidrodinâmica de um leito de jorro bidimensional**. 1994. Dissertação (Mestrado - Engenharia Química) – Departamento de Termofluidodinâmica, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 1994.

ZHAO, X. L. Flow patterns of solids in a two-dimensional spouted bed with draft plates: PIV measurement and DEM simulations. **Powder Technology**, v. 183, p. 79-87, nov. 2007.

## APÊNDICE A – OBTENÇÃO DA VAZÃO MÁSSICA DO AR EM UMA PLACA DE ORIFÍCIO

Para a obtenção da vazão mássica do ar ( $\dot{m}_{ar}$ ), segue-se a Norma ASME MFC-14M-2003 (para medidor do tipo placa de orifício), de onde tem-se a seguinte Equação:

$$\dot{m}_{ar} = \frac{e C_d A_{or} \sqrt{2 \rho_g \Delta P_{or}}}{\sqrt{1 - \beta_d^4}} \quad (25)$$

- Onde o fator de compressibilidade ( $e$ ) é obtido pela seguinte Equação:

$$e = 1 - (0,41 + 0,35\beta_d^4) \frac{\Delta P_{or}}{K P_1} \quad (26)$$

- A razão do diâmetro da placa de orifício pelo diâmetro da tubulação do sistema, que deve estar nas faixas de  $5 \leq \beta \leq 7$  e  $25 \leq D \leq 40$  mm, pode ser encontrada pela seguinte relação:

$$\beta_d = \frac{d_{or}}{D} \quad (27)$$

- O coeficiente de perda de carga ( $K$ ) é dado pela a Equação a seguir:

$$K = \frac{2w}{\rho_g v_{ar,t}^2} \quad (28)$$

- A velocidade do ar na tubulação ( $v_{ar,t}$ ) é calculado, considerando-se as dimensões da tubulação utilizada, por:

$$v_{ar,t} = \frac{\dot{m}_{ar}}{\rho_g \left( \frac{\pi D^2}{4} \right)} \quad (29)$$

- O coeficiente de perda de pressão estático é:

$$w = \frac{\sqrt{1 - \beta^4} - C_d \beta_d^2}{\sqrt{1 - \beta^4} + C_d \beta_d^2} \Delta P_{or} \quad (30)$$

- O coeficiente de descarga,  $C_d$ , é obtido pela Equação:

$$\begin{aligned}
 C_d = & \left[ 0,5991 + \frac{0,0044}{D} \right. & (31) \\
 & + \left( 0,3155 + \frac{0,0175}{D} \right) \left( \left( \frac{d_{or}}{D} \right)^4 + 2 \left( \frac{d_{or}}{D} \right)^{16} \right) \left. \right] \sqrt{1 - \left( \frac{d_{or}}{D} \right)^4} \\
 & + \left[ \frac{0,52}{D} - 0,192 \right. \\
 & + \left. \left( 16,48 - \frac{1,16}{D} \right) \left( \left( \frac{d_{or}}{D} \right)^4 + 4 \left( \frac{d_{or}}{D} \right)^{16} \right) \right] \sqrt{\frac{1 - \left( \frac{d_{or}}{D} \right)^4}{Re_D}}
 \end{aligned}$$

para  $Re_D \geq 1000$

A velocidade superficial do gás ( $u_0$ ) é :

$$u_0 = \frac{\dot{m}_{ar}}{\rho_g \cdot A_{st}} \quad (32)$$