

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E
NUCLEARES
COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE

EUDES BERTONY VIEIRA

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE PLANTA VIRTUAL EM AMBIENTE 3D DA UNIDADE
PILOTO A FRIO TIPO FCC PARA COMPARAÇÃO E VALIDAÇÃO DE PARÂMETROS
FLUIDODINÂMICOS COM TOMOGRAFIA GAMA**

Recife

2022

EUDES BERTONY VIEIRA

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE PLANTA VIRTUAL EM AMBIENTE 3D DA UNIDADE
PILOTO A FRIO TIPO FCC PARA COMPARAÇÃO E VALIDAÇÃO DE PARÂMETROS
FLUIDODINÂMICOS COM TOMOGRAFIA GAMA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologias Energéticas e Nucleares.

Área de concentração: Aplicações de radioisótopos na indústria e medicina.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Costa Dantas.

Orientador: Prof. Dr. Vinicius Saito Monteiro de Barros.

Recife

2022

V658p Vieira, Eudes Bertony.
Projeto e construção de planta virtual em ambiente 3D da unidade piloto a frio tipo FCC para comparação e validação de parâmetros fluidodinâmicos com tomografia gama / Eudes Bertony Vieira. 2022.
73 f: figs., tabs., abrev. e siglas.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Costa Dantas.
Orientador: Prof. Dr. Vinicius Saito Monteiro de Barros.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Recife, 2022.
Inclui referências.

1. Tecnologias energéticas e nucleares. 2. Distribuição radial de sólidos. 3. Simulação CFD. 4. Escala piloto. 5. Catalisador FCC. 6. Full-loop. I. Dantas, Carlos Costa (Orientador). II. Barros, Vinicius Saito Monteiro de (Orientador). III. Título.

UFPE

621.4837 CDD (22. ed.)

BCTG / 2022 - 340

EUDES BERTONY VIEIRA

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE PLANTA VIRTUAL EM AMBIENTE 3D DA UNIDADE
PILOTO A FRIO TIPO FCC PARA COMPARAÇÃO E VALIDAÇÃO DE PARÂMETROS
FLUIDODINÂMICOS COM TOMOGRAFIA GAMA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Área de concentração: Aplicações de radioisótopos na indústria e medicina.

Aprovada em: 20 / 06 / 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Silvio de Barros Melo (Examinador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. André Felipe Vieira da Cunha (Examinador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Hilário Jorge Bezerra de Lima Filho (Examinador)
Universidade Católica de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela oportunidade da minha vida em realizar um dos meus sonhos, fazer mestrado, e também a minha família por todo apoio.

Gostaria de agradecer ao meu orientador e professor Dantas, por todo apoio e orientação que tem me dado nessa trajetória maravilhosa, aprendi muito com ele, sempre focado no trabalho e na apresentação dos resultados.

E ao senhor Otavio Santana, que me ajudou bastante, durante os trabalhos, dando ideias maravilhosas e sugestões do meu trabalho.

E aos meus amigos, que me ajudaram nessa caminhada, como Leandro, Victor, Milton, Zacarias, Antonio, pelo apoio e troca de conhecimento.

E não poderia esquecer de agradecer ao PROTEN, por todo investimento de conhecimento que aprendi com os professores do Departamento de Energia Nuclear da UFPE.

E gostaria de agradecer também a CAPES, pelo apoio financeiro durante a trajetória do curso.

RESUMO

O processo industrial do Craqueamento Catalítico Fluidizado - FCC é ainda hoje um dos mais utilizados na produção de gasolina no mundo. A necessidade de manter as unidades industriais produtivas requer continua pesquisa do processo. Duas linhas mestras a cinética e a fluidodinâmica são investigadas em plantas piloto. A cinética lida com o craqueamento catalítico do petróleo. A fluidodinâmica estuda o escoamento do leito fluidizado circulante. A UPF - Unidade Piloto a Frio foi instalada para estudar a fluidodinâmica do FCC. A concentração do sólido em circulação é medida pela transmissão da radiação gama. A simulação da distribuição radial de sólidos com a Computacional Fluid Dynamics - CFD apresentou concordância com os perfis medidos na UPF. Continuando os trabalhos de simulação uma planta virtual UPFV em ambiente CAD 3D foi construída obedecendo à similaridade geométrica do modelo físico. O trabalho atual tem como objetivo desenvolver a simulação em CFD na planta virtual, com o fluxo bifásico circulando ao longo da unidade, o full-loop. Significativa contribuição aos perfis da taxa de circulação do sólido e distribuição de pressão ao longo da unidade vem sendo descrita na literatura. Os perfis das fases sólida e gasosa foram comparados com as medidas experimentais em etapas até estabelecer a correspondência dual UPF e unidade virtual. Sem a limitação do modelo físico para instalar medidores de pressão a coleta de dados na UPFV proporcionou mais adequada investigação dos perfis de distribuição axial de sólidos. Os pontos críticos da geometria do FCC, a base e o topo do riser, foram analisados por meio de gráficos gerados pelo software Solidworks permitindo operar no estado estacionário de acordo com as hipóteses dos modelos teóricos. Na sequência a distribuição radial da velocidade de sólidos foi medida, resultado que permitiu a caracterização da taxa de circulação do catalisador e comparação com perfis obtidos com a transmissão da radiação gama. Critérios para validação de perfis fluidodinâmicos foram propostos e discutidos com dados da literatura.

Palavras-chave: distribuição radial de sólidos; simulação CFD; escala piloto; catalisador FCC; full-loop.

ABSTRACT

The industrial process of Fluid Catalytic Cracking - FCC is still one of the most used in the production of gasoline in the world. The need to maintain productive industrial units requires continuous process research. Two guidelines, kinetics and fluid dynamics, are investigated in pilot plants. Kinetics deals with the catalytic cracking of oil. Fluid dynamics studies the flow of the circulating fluidized bed. The UPF - Cold Pilot Unit was installed to study the fluid dynamics of the FCC. The concentration of the circulating solid is measured by the transmission of gamma radiation. The simulation of the radial distribution of solids with Computational Fluid Dynamics - CFD showed agreement with the profiles measured in the UPF. Continuing the simulation work, a virtual UPFV plant in a 3D CAD environment was built following the geometric similarity of the physical model. The current work aims to develop the CFD simulation in the virtual plant, with the two-phase flow circulating along the unit, the full-loop. A significant contribution to the solid circulation rate profiles and pressure distribution along the unit has been described in the literature. The profiles of solid and gas phases were compared with experimental measurements in steps until the dual UPF and virtual unit correspondence was established. Without the limitation of the physical model to install pressure gauges, data collection at the UPFV provided a more adequate investigation of the axial distribution profiles of solids. The critical points of the FCC geometry, the base and the top of the riser, were analyzed using graphics generated by the Solidworks software, allowing operate on stationary state according to the fluid dynamics of theoretical models. Subsequently, the radial distribution of the solids velocity was measured, a result that allowed the characterization of the catalyst circulation rate and comparison with profiles obtained with the transmission of gamma radiation. Criteria for validating fluid dynamics profiles were proposed and discussed with data from the literature.

Keywords: radial distribution of solids; CFD simulation; pilot scale; FCC catalyst; full loop.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 1 - | Unidade Piloto a Frio | 13 |
| Figura 2 - | Unidade Piloto a Frio Virtual..... | 15 |
| Figura 3 - | Representação da relação L/R..... | 20 |
| Figura 4 - | Contorno da fração volumétrica de sólidos com dupla entrada na base do riser. | 21 |
| Figura 5 - | Contorno da fração volumétrica de sólidos com uma entrada na base do riser. . | 22 |
| Figura 6 - | Estrutura metálica da UPF..... | 24 |
| Figura 7 - | Mostra Desenho em 3D do Riser com Fluxo de Sólidos Ascendente no ciclo do catalisador e detalhes da vista superior e base do riser. | 25 |
| Figura 8 - | Representação do fluxo bifásico em circulação na unidade virtual. | 26 |
| Figura 9 - | Modelo tridimensional da câmara de bombeamento em CAD, medidas em milímetros..... | 27 |
| Figura 10 - | Velocidade [m/s] de algumas partículas em determinados instantes simulados no interior da bomba. | 28 |
| Figura 11 - | Simulação de fluxo no sistema em duas geometrias de entrada e saída diferentes (A e B). | 28 |
| Figura 12 - | Interface da criação do projeto..... | 30 |
| Figura 13 - | Interface dos tipos de análise. | 30 |
| Figura 14 - | Interface das condições iniciais..... | 31 |
| Figura 15 - | Interface condições limites..... | 31 |
| Figura 16 - | Interface Metas..... | 32 |
| Figura 17 - | Interface do estudo da partícula. | 32 |
| Figura 18 - | Procedimento para simulação CFD na planta virtual..... | 33 |
| Figura 19 - | Perfil axial do fluxo bifásico..... | 35 |
| Figura 20 - | Secção transversal do riser com fluxo bifásico..... | 36 |
| Figura 21 - | Vazão volumétrica com vazão de entrada de ar de 650 L/min..... | 38 |
| Figura 22 - | Vazão volumétrica em função da vazão de entradas de ar..... | 39 |
| Figura 23 - | Vazão mássica com vazão de entrada de ar de 650 L/min..... | 40 |
| Figura 24 - | Vazão Mássicas e com três vazões de entrada de ar..... | 41 |
| Figura 25 - | Pressão ao longo do riser com a vazão de 650 L/min..... | 42 |
| Figura 26 - | Pressão ao longo do riser com três vazões de entrada de ar..... | 43 |
| Figura 27 - | Velocidade de sólido na região do riser com a vazão 650 L/min. | 44 |
| Figura 28 - | Velocidade de sólido em função das vazões de entrada de ar..... | 45 |

| | |
|--|----|
| Figura 29 - Velocidade de sólido com três vazões volumétricas de ar. | 46 |
| Figura 30 - Velocidade de sólido medido em circulação no riser com vazão de 650 L/min. | 47 |
| Figura 31 - Velocidade do sólido simulada e calculada com três vazões de entrada. | 49 |
| Figura 32 - Diferença de pressão medido no perfil de pressão do riser. | 51 |
| Figura 33 - Distribuição radial da pressão em função da vazão volumétrica de entrada. | 52 |
| Figura 34 - Comparação entre dados experimentais e simulados com o MCNPX e tomografia gama no riser. | 53 |
| Figura 35 - Comparação de informações da tomografia MCNPX com dados do Ansys Fluent e experimentais do perfil radial da fração volumétrica de sólidos para altura de 0.650 m. | 54 |
| Figura 36 - Distribuição radial da velocidade do sólido com vazão de 650 L/min. | 55 |
| Figura 37 - Distribuição radial da Velocidade do sólido em função da vazão de ar. | 56 |
| Figura 38 - Perfil radial da velocidade de sólidos em simulação CFD Ansys. | 57 |
| Figura 39 - Perfil radial da velocidade de sólidos no modelo núcleo-anelar. | 58 |
| Figura 40 - Velocidade de sólido nas secções transversais do riser com vazão de 650 L/min. | 59 |
| Figura 41 - Velocidade do sólido no riser em função da altura e da vazão de ar. | 60 |
| Figura 42 - Pressão ao longo da planta virtual com a vazão 675 L/min. | 61 |
| Figura 43 - Pressão ao longo da planta virtual com três vazões de entrada de ar. | 62 |
| Figura 44 - Queda de pressão ΔP ao longo do riser. | 63 |
| Figura 45 - Os perfis da fração volumétrica e velocidades de sólido e gás. | 64 |
| Figura 46 - Perfis da fração volumétrica e da velocidade de sólidos. | 65 |
| Figura 47 - Intervalo de confiança para os dados de controle. | 66 |
| Figura 48 - Perfis de pressão simulado e experimental comparados com regressão. | 67 |
| Figura 49 - Distribuição dos resíduos da regressão obtidos com o bootstrap. | 68 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------------|--|----|
| Tabela 1 - | Equações Empíricas para Caracterizar o Escoamento Bifásico. | 19 |
| Tabela 2 - | Componentes da UPFV. | 26 |
| Tabela 3 - | Condições para simulação da vazão de 650 L/min. | 33 |
| Tabela 4 - | Distribuição axial da pressão no riser com três vazões volumétricas, dados simulados. | 37 |
| Tabela 5 - | Distribuição axial da pressão no riser com três vazões volumétricas, dados experimentais. | 37 |
| Tabela 6 - | Velocidade de sólido, dados simulados das três vazões volumétricas. | 48 |
| Tabela 7 - | Velocidade de sólido calculada para três vazões volumétricas. | 49 |
| Tabela 8 - | Diferença de pressão no riser em função da vazão de entrada de ar. | 50 |
| Tabela 9 - | ΔP total no riser em função da vazão de entrada de ar. | 51 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- UPFV – Unidade Piloto a Frio Virtual.
- FCC – Craqueamento Catalítico Fluidizado.
- CAD – Desenho Assistido por Computador.
- CAE – Engenharia Auxiliada por Computador.
- L/R – Largura e Raio.
- CFB – Fluxo Bifásico Circulante.
- DAV – Dispositivo de Assistência Ventricular.
- LFC – Leito Fluidizado Circulante.
- MVF – Método dos Volumes Infinitos.

SUMÁRIO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 12 |
| 2 | OBJETIVOS | 16 |
| 2.1 | Objetivo geral: | 16 |
| 2.2 | Objetivos específicos:..... | 16 |
| 3 | REVISÃO DE LITERATURA | 17 |
| 3.1 | Leito Fluidizado Circulante | 17 |
| 3.2 | Unidade Piloto tipo FCC | 17 |
| 3.3 | Parâmetros Fluidodinâmicos | 18 |
| 3.4 | Simulação com CFD do Escoamento Bifásico na UPF. | 20 |
| 4 | MATERIAIS E MÉTODOS. | 23 |
| 4.1 | Construção da UFFV..... | 23 |
| 4.2 | Simulação CFD do Fluxo Bifásico na UPFV. | 27 |
| 4.3 | Programação para Simulação..... | 30 |
| 4.4 | Análise de Dados e Precisão. | 33 |
| 5 | RESULTADOS | 35 |
| 5.1 | Amostragem de Referência. | 35 |
| 5.2 | Similaridade funcional da UPFV..... | 36 |
| 5.3 | Caracterização do perfil axial na UPFV..... | 42 |
| 5.3.1 | Pressão. | 42 |
| 5.3.2 | Velocidade de sólido. | 43 |
| 5.3.3 | Diferença de pressão ΔP | 50 |
| 5.4 | Caracterização do perfil radial na UPFV..... | 52 |
| 5.4.1 | Pressão. | 52 |
| 5.4.2 | Velocidade de sólido. | 55 |
| 5.5 | Comparação cruzada dos perfis axial e radial. | 58 |
| 5.5.1 | Velocidade de sólido. | 59 |
| 5.6 | Simulação da unidade o estado do full-loop. | 61 |
| 5.7 | Caracterização dos perfis da UPFV..... | 63 |
| 5.8 | Avaliação estatística e critério de validação. | 66 |
| 6 | CONCLUSÕES..... | 69 |
| 6.1 | Sugestão para trabalhos futuros..... | 70 |
| | REFÊNCIAS | 71 |

1 INTRODUÇÃO

O processo industrial do Craqueamento Catalítico Fluidizado (FCC), opera como leito fluidizado circulante. O fluxo multifásico resultante da quebra das moléculas pesadas em compostos de estruturas mais leves com maior valor comercial é um sistema complexo. A necessidade de manter o processo de FCC competitivo no mercado e atender os requisitos de proteção do meio ambiente requerem intensa atividade de pesquisa e desenvolvimento. Duas linhas mestras de pesquisa no FCC são desenvolvidas em unidades pilotos, a cinética e a fluidodinâmica. Esta última utiliza unidades a frio, operando em temperatura ambiente, com a intenção de estudar o escoamento do sistema bifásico circulante CFB – *Circulating Fluidized Bed*. O fluxo bifásico é uma mistura de gás e sólido que é ascendente no *riser* passa pelo vaso de separação e o sólido volta pela coluna de retorno para o *riser*.

Baseado nessa temática, foi desenvolvido no Departamento de Energia Nuclear (DEN), da Universidade Federal do Pernambuco (UFPE), uma Unidade Piloto a Frio (UPF). A construção da planta priorizou o material transparente acrílico, para visualizar o escoamento e o projeto seguiu critérios de *scale-up* (Santos 2004)

Foram desenvolvidos métodos de análise para compreender o escoamento bifásico na UPF, e medições de parâmetros e perfis da concentração e velocidade do catalisador ao longo do *riser* estão descritos (DANTAS et al. (2006). Estudos foram realizados para validar modelos fluidodinâmico de ciclones e colunas de retorno (SANTOS; DANTAS, 2004).

A continuidade da investigação do escoamento bifásico na unidade piloto requereu o estudo da Fluidodinâmica Computacional – CFD. Os trabalhos de Lima ((2014), introduziram métodos para visualizar a distribuição do fluxo em circulação no *riser*, ampliando os recursos experimentais disponível na UPF para uma melhor compreensão do escoamento em unidade tipo FCC.

O aperfeiçoamento da UPF ocorreu baseado nos resultados obtidos, com o objetivo da similaridade geométrica e funcional com a planta em escala industrial, a melhoria contínua (Cavalheiro et al., 2011) (Bock et al., 2011b). Esse tema foi avaliado, considerando os critérios de *scale-up* do projeto e o conhecimento adquirido com o estudo do leito fluidizado circulante na UPF, por Moura (2015).

Figura 1 mostra a UPF, a parte da unidade onde ocorre a circulação do catalisador, *riser*, coluna de retorno e vaso de separação na parte superior do equipamento. O fluxo bifásico gás-

sólido ascende no riser, onde se vê assinaladas as alturas das seções de testes, separa no vaso acima e o sólido retorna pela coluna da direita.

Figura 1 - Unidade Piloto a Frio



Fonte: Claudino (2018).

Os estudos dos parâmetros ao longo do *riser*, da distribuição da concentração de sólidos, fração volumétrica, velocidade do gás, velocidade do sólido, velocidade de *slip*, e a validação dos modelos matemáticos apresentam dificuldades segundo a literatura atual. O transporte de sólidos em fase densa agravado pela recirculação de sólidos no riser, permanecem problemas sem predição teórica na geometria do FCC (Cruz, et al, 2016); a avaliação inclui estudos com CFD (Brito, et al, 2013).

Significativo desenvolvimento nas condições da simulação que apontam para uma melhor compreensão do que ocorre na circulação da fase sólida, estão apresentadas em CFD do full-loop, que é mais representativo do que só o estudo CFD só do riser. Obviamente o tempo de computação passa a ser crítico requerendo estratégias para viabilizar o estudo da circulação do fluxo bifásico na planta toda.

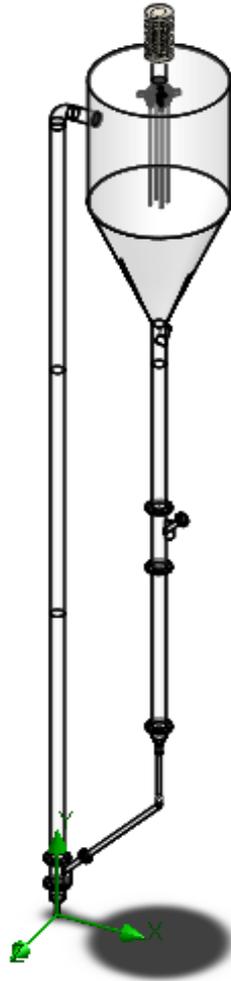
O projeto do full-loop foi elaborado a partir do conhecimento do programa *SolidWorks*, utilizado no desenho de peças e componentes nas etapas de aperfeiçoamento da UPF. O desenho da planta inteira em 3D em escala reproduzindo a similaridade geométrica obtida no modelo físico. No mesmo programa a existência de modulo CFD seria adequado para estudar a fluidodinâmica na planta realizada em CAD no ambiente SolidWorks.

A literatura descrevendo a circulação do fluxo bifásico na planta inteira, em temperatura ambiente se mostrou escassa, em comparação com as investigações em unidades tipo FCC operando a altas temperaturas. Os recursos disponibilizados pelo software permitiram realizar experimentos simplificados que foram sendo aproximados até obter a planta virtual a UPFV com ajuda da literatura que foca em sistemas frios.

Com a UPFV em operação os trabalhos de avaliação dos dados obtidos passaram pelo cálculo com equações fundamentais, empíricas, estabelecidas na análise do FCC industrial. A etapa seguinte foi conseguir que o estudo CFD dos perfis de pressão e concentração de sólidos tinham equivalência no sistema dual modelo físico – planta virtual.

A Figura 2 mostra o desenho 3D da UPFV, o ciclo do catalisador que pode ser comparado com a foto da UPF apresentada na Figura 1.

Figura 2 – Unidade Piloto a Frio Virtual



Fonte: O autor (2022).

A planta virtual, copiando o modelo físico, possibilita a análise do fluxo em toda a unidade piloto, o full-loop. Esse trabalho apresenta em detalhes o modelo 3D e a simulação CFD do fluxo bifásico em circulação. A investigação da distribuição do escoamento bifásico nas direções axiais e radiais em diversas alturas do riser foi quantificada e a pressão ao longo da unidade está visualizada em gráfico.

Certamente uma contribuição na direção da solução ou minimização de problemas intrínsecos a geometria do FCC como a recirculação de sólidos ou backmixing.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Aperfeiçoar o protótipo Virtual da Unidade Piloto a Frio UPFV, realizar a análise do fluxo bifásico ar-catalisador por meio da fluidodinâmica computacional CFD, comparar com os resultados obtidos com as equações empíricas da literatura e validar com dados experimentais da UPF.

2.2 Objetivos específicos

1. Aperfeiçoar a montagem da UPFV do desenho em 3D da unidade piloto; objetivando à similaridade geométrica e investigando a similaridade funcional a partir das variáveis independentes vazão de entrada de ar e injeção de sólidos.
2. Avaliar a injeção de sólidos na UPFV por meio da comparação com medidas experimentais da distribuição da pressão ao longo do riser e da distribuição da pressão calculada com as equações empíricas da fluidodinâmica, na literatura.
3. Os perfis do escoamento bifásico obtidos com a simulação na UPFV, devem ser comparados com valores experimentais e valores da literatura para caracterizar o escoamento bifásico no sistema CFB.
4. Estudar a distribuição radial do perfil de sólidos na UPFV, na caracterização do escoamento bifásico, e também, visando a comparação com outros trabalhos que mediram a distribuição de sólidos na UPF, por meio da tomografia gama e pela simulação com o método de Monte Carlo.
5. Validar os perfis simulados no *riser* da UPFV com os dados medidos no *riser* da UPF experimental e com dados obtidos com as equações empíricas da fluidodinâmica.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Leito Fluidizado Circulante

O escoamento bifásico gás-sólido no interior do reator tipo riser de uma unidade de FCC, promove fluidização altamente eficiente, propiciando elevadas taxas de transferência de calor e massa, intensificando processos reativos. Há diferentes regimes hidrodinâmicos, caracterizados por diferentes padrões de escoamento. A caracterização do escoamento bifásico gás-sólido, utilizando os modelos empíricos proposto por Rabinovich e Kalman (2011), está baseada em diversos materiais e métodos experimentais. Considerando os possíveis padrões de escoamento multifásico com entrada gás – sólido que podem ocorrer para sistemas de leito fluidizados e suas características. Então, um diagrama generalizado de padrões de escoamento bifásico do tipo gás – sólido para os sistemas de transporte pneumático vertical e leito fluidizado, no qual os diferentes padrões de escoamento são classificados segundo os grupos de Geldart (1973).

3.2 Unidade Piloto tipo FCC

No riser industrial ocorrem as reações de craqueamento catalítico em alta temperatura. As Unidades Piloto a Frio - UPF, são usadas para estudar os problemas ligados à fluidodinâmica na planta industrial. São também relativamente baratas e demandam pouco tempo para construção (KNOWLTON, 2000). Pela própria condição de operação em temperatura ambiente, um modelo a frio pode ser confeccionado em material transparente, importante característica para a estrutura que permite a observação de como os sólidos escoam ou encontram regiões de estagnação, propiciando um entendimento melhor das causas dos possíveis problemas em estudo.

O objetivo de construir uma unidade piloto está intrinsecamente associado ao futuro *scale-up* para transferir o conhecimento e a inovação que se propõe a estudar. A concepção do projeto piloto a frio, requer similaridade geométrica, na obtenção de um CFB – Circulating Fluidized Bed, reator. As dimensões devem obedecer aos dados de projeto (MATSEN, 1996), por exemplo, a relação comprimento/diâmetro do *riser* varia entre 50 e 70. Em princípio, as relações geométricas e os parâmetros de operação, devem permitir um *scale-up* expresso em números adimensionais.

A UPF construída em acrílico, o riser com 6,2 m altura e diâmetro interno de 92 mm, por onde escoam uma mistura de ar comprimido e catalisador. Semelhante a unidade industrial ocorre o

ciclo do catalisador, como na Figura 21. Seguindo o planejamento, foram consideradas as características hidrodinâmicas relevantes para um riser FCC (DEROUIN, 1997), na unidade piloto figura 1, foram observadas as relações geométricas do projeto, e a similaridade geométrica e funcional, visando o processo de scale-up foram estudadas por (MOURA, 2015).

Foram instalados medidores de pressão ao longo do riser e para medir a concentração de sólidos fonte ^{243}Am e detectores de NaI (TI) colocados em posições opostas no riser, operam por meio da transmissão gama. Além de observações de fenômenos do escoamento bifásicos, nessa unidade experimental foram determinados parâmetros fluidodinâmicos, para obtenção de perfis de concentração axial, radial e velocidade do catalisador nas várias seções ao longo do riser. Dados obtidos foram comparados com valores da literatura por meio das Equações Básicas da fluidodinâmica da Tabela 1. Estudos de perfis e validação experimental de modelos matemáticos fluidodinâmico de risers, ciclones e colunas de retorno, estão descritos por (SANTOS; DANTAS, 2004).

A interpretação dos perfis de pressão axial, concentração e velocidade de sólidos ao longo do riser requereu o estudo com a simulação CFD para melhor avaliação da distribuição do catalisador em circulação. Os trabalhos iniciais com CFD e a comparação com dados experimentais foram realizados na tese de Lima Filho (2014).

3.3 Parâmetros Fluidodinâmicos

A caracterização do escoamento bifásico gás-sólido, utilizando modelos empíricos foi proposto pelos autores já citados Rabinovich e Kalman (2011). Na Tabela 1, estão listados modelos estabelecidos na literatura e calculados com dados experimentais obtidos na UPF.

Tabela 1 – Equações Empíricas para Caracterizar o Escoamento Bifásico

| | |
|--|--|
| $\varepsilon_s = \frac{1}{(\rho_p - \rho_f)g \Delta Z} \Delta P$ <p>Medida na Industria</p> | A fração volumétrica dos sólidos, dada pela diferença de pressão, ΔP , entre dois sensores separados por uma distância ΔZ , diferença entre as densidades ($\rho_p - \rho_f$) da partícula e do gás e g aceleração da gravidade. Valor médio em ΔZ |
| $\varepsilon_{sr} = \frac{1}{\rho_s \left(\frac{\mu}{\rho_s}\right) C} \ln \left(\frac{I_V}{I_F}\right)$ <p>Equação derivada</p> | Distribuição radial da fração volumétrica de sólidos, dada coeficiente da atenuação mássico, a relação entre o linear μ e a densidade de empacotamento do sólido ρ_s , C o comprimento das cordas internas no tubo-riser, as intensidades gama I_F e I_V do riser vazio e com fluxo |
| $C_s = \frac{\Delta P}{\Delta z g} = \rho_p \varepsilon_s$ <p>LUCKOS; HOED, 2005</p> | A concentração de sólidos no riser, ρ_p é a densidade da partícula sólida. Valor médio em ΔZ . |
| $u_s = \frac{\dot{m}}{\rho_p A(1 - \varepsilon)}$ <p>DAVIDSON, 2000</p> | Velocidade de sólidos, ρ_p densidade da partícula, A área da secção do riser, $(1 - \varepsilon)$ a fração volumétrica de sólidos e \dot{m} a injeção de sólidos dada em massa na unidade de tempo |
| $v_s = u_g - u_s$ <p>DAVIDSON, 2000</p> | Velocidade de slip, dada pela diferença entre as velocidades do gás e do sólido |
| $\rho_{nucleo}(x, y) = \begin{cases} 1, se \sqrt{x^2 + y^2} < S \\ 0, se \sqrt{x^2 + y^2} > S \end{cases}$ | Estrutura do fluxo definida como núcleo coordenadas: x e y, círculo de raio S , cujo centro coincide com o centro do tubo na origem do sistema de coordenadas. |
| $\rho_{anular}(x, y) = \begin{cases} 1, se \sqrt{x^2 + y^2} > S \\ m, se \sqrt{x^2 + y^2} < S \end{cases}$ <p>DANTAS 2006</p> | Estrutura do fluxo definida como anular $m = (C - r)$ o comprimento C da corda interna do riser e r o raio do círculo S |

Na Tabela 1, ε_s corresponde a $(1 - \varepsilon)$, onde ε é a fração de vazios de um leito gás-sólido, ρ densidade [kg/m^3]. É medida da distribuição axial da fração volumétrica de sólidos. É uma técnica intrusiva que causa perturbação ao fluxo.

ε_{sr} É equação baseada em *Beer-Lambert*, adaptada por Casagrande para o tubo-riser e na qual foi substituída o diâmetro do riser por C o comprimento das cordas no caso da varredura de translação, na tomografia gama. É medida não intrusiva da distribuição radial da fração volumétrica de sólidos, (Oliveira, et al. 2018)

A concentração de sólidos, C_s , dada em [kg/m^3], é determinada como uma função de ΔP e é equacionada com a fração volumétrica dos sólidos.

u_s , também, pode ser calculado a partir da v_s , considerando as condições propostas por DAVIDSON (2000), tem-se:

$$v_s = \begin{cases} 0, & \text{se } u_s = u_g \\ 1:5 & \text{se } u_s = u_g - v_s \end{cases}$$

Como a velocidade superficial do gás dada por $u_g = \frac{U}{\varepsilon}$, a velocidade de *slip* pode ser zero ou está no intervalo de 1 até 5.

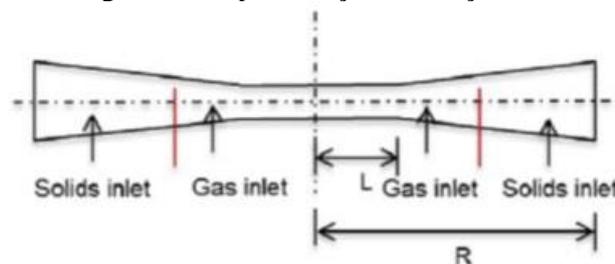
A estrutura núcleo-anular do fluxo foi proposta por (Davidson 2000), que se baseou em medidas experimentais realizadas com sinais de fontes radioativas, com as quais informações significativas foram obtidas por (Dudukovic, 2003). A fórmula para calcular a estrutura núcleo-anular com dados das medidas com transmissão gama foi definida por DANTAS et al. (2006).

3.4 Simulação com CFD do Escoamento Bifásico na UPF

A teoria da modelagem e simulação é fundamentada nas equações de Navier – Stokes, cuja formulação envolvem as equações da conservação da massa (continuidade) e as equações do movimento (momentum), (Gidaspow e Huili, 2003). A modelagem CFD de reatores *riser* de FCC tem sido realizada por diversos autores e relatados na literatura (GAO et al., 2009; NAYAK et al., 2005; THEOLOGOS; MARKATOS, 1993).

Li Peng (2016), investigou através do *software* *MFIX* em CFD, a estrutura núcleo-anular do fluxo bifásico, avaliando a distribuição radial por meio da relação L/R Figura 7, na hidrodinâmica de *riser* de CFB.

Figura 3 – Representação da relação L/R

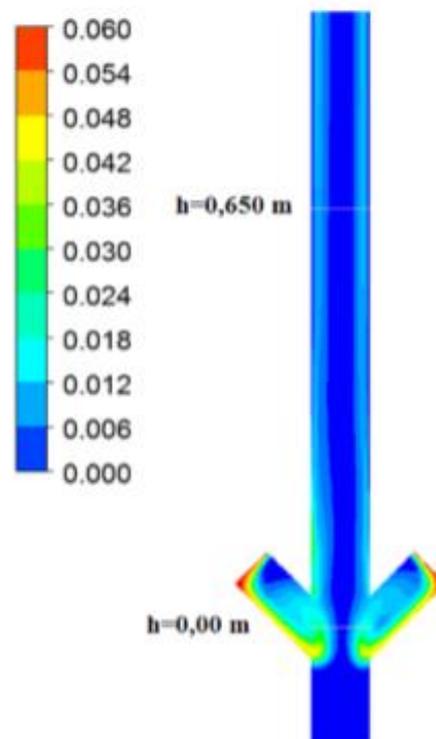


Fonte: Li Peng (2016).

A Figura 3, apresenta esquematicamente uma seção transversal do riser, com setas sinalizando o fluxo ascendente, o segmento L a partir do centro e o raio R. De acordo com o critério L/R os valores mais altos indicam fluxo tipo núcleo e o contrário é o fluxo anular, que corresponde a valores mais baixos da relação L/R. Os valores correspondem as medidas da velocidade de sólidos.

LIMA et al (2014) utilizou a simulação em CFD fundamentada na teoria cinética do escoamento granular para também obter distribuição radial e axial da fração volumétrica de sólidos. Para as simulações foi utilizado o software comercial ANSYS FLUENT versão 15.0. A Figura 4, mostra a simulação do perfil da fração volumétrica do catalisador na entrada do *riser* da UPF para diferentes instantes de tempo de operação. Para demonstrar o *riser* simétrico, que implica concordância da teoria com a geometria do *riser* industrial, foi avaliada a situação hipotética de haver dupla entrada de sólidos.

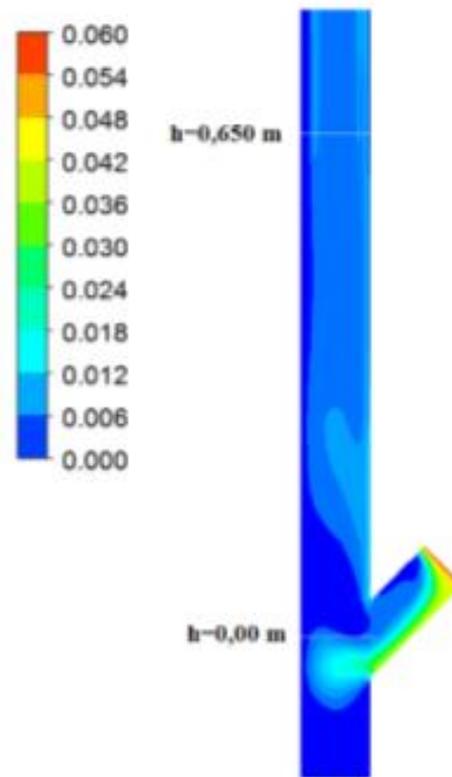
Figura 4 – Contorno da fração volumétrica de sólidos com dupla entrada na base do *riser*



Fonte: Lima 2014.

Afastada qualquer interpretação equivocada dos dados, a continuação da simulação de acordo com a planta física com uma única entrada na alimentação de sólidos, provou a realidade do *riser* simétrico.

Figura 5 – Contorno da fração volumétrica de sólidos com uma entrada na base do riser.



Fonte: Lima 2014.

A Figura 5, apresenta a parte do riser com a base na altura $h = 0,00$ m, a entrada de sólidos acima, e o fluxo bifásico ascendente até a altura $h = 0,650$ m; a esquerda a escala de cores de 0 até 0,060, representando a fração volumétrica de sólidos. A entrada de sólidos gera a zona de turbulência no encontro com entrada de ar abaixo da base do riser. A Figura 5, foca na tendência a distribuição radial simétrica na região de transição, apesar da entrada de sólidos ser lateral. O riser simétrico na região de aceleração é uma das hipóteses dos modelos de simulação em CFD do fluxo bifásico circulante CFB.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

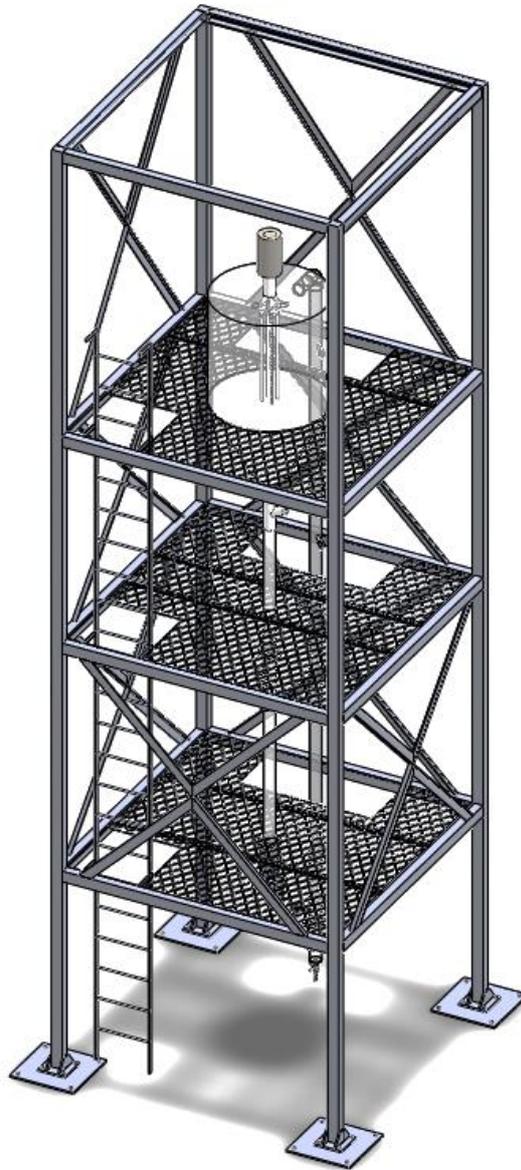
4.1 Construção da UFFV

Na unidade FCC a região de transporte denso é um assunto de modelo complexo, além disso, o efeito da recirculação do sólido, o backmixing, está associado à geometria do riser Xiaocheng L (2014). Para prever a fração volumétrica de sólidos, a distribuição de velocidades de fase por simulação numérica usando o crescente poder do computador é uma investigação atraente, enquanto a validação experimental exige um modelo de controle sensível a essas variáveis (Min Wang, 2019). O estudo de loop completo de um sistema de leito fluidizado frio, o full-loop, tem apresentado significativo desenvolvimento na solução de problemas do FCC. A simulação e validação hidrodinâmica no sistema dual: planta experimental e full-loop virtual, apresenta vantagens comparada a simulação só do riser em CFD, por exemplo *Fluid dynamics study on a dual fluidized bed cold-flow model* (M.A. Habl, 2017).

Para desenhar a geometria da unidade virtual dual da UPF, foi utilizado o *SolidWorks*, que é uma ferramenta reconhecida em projetos CAD com geometria 3D, e já era utilizada nos desenhos de peças da UPF, por exemplo válvula injetora de sólidos Moura 2015.

Foi construído também a estrutura metálica tridimensional para representação da parte interna no laboratório, o ciclo do catalisador e instrumentos de medidas, como mostra a figura 6, descrita em detalhes por (Bertony, 2016).

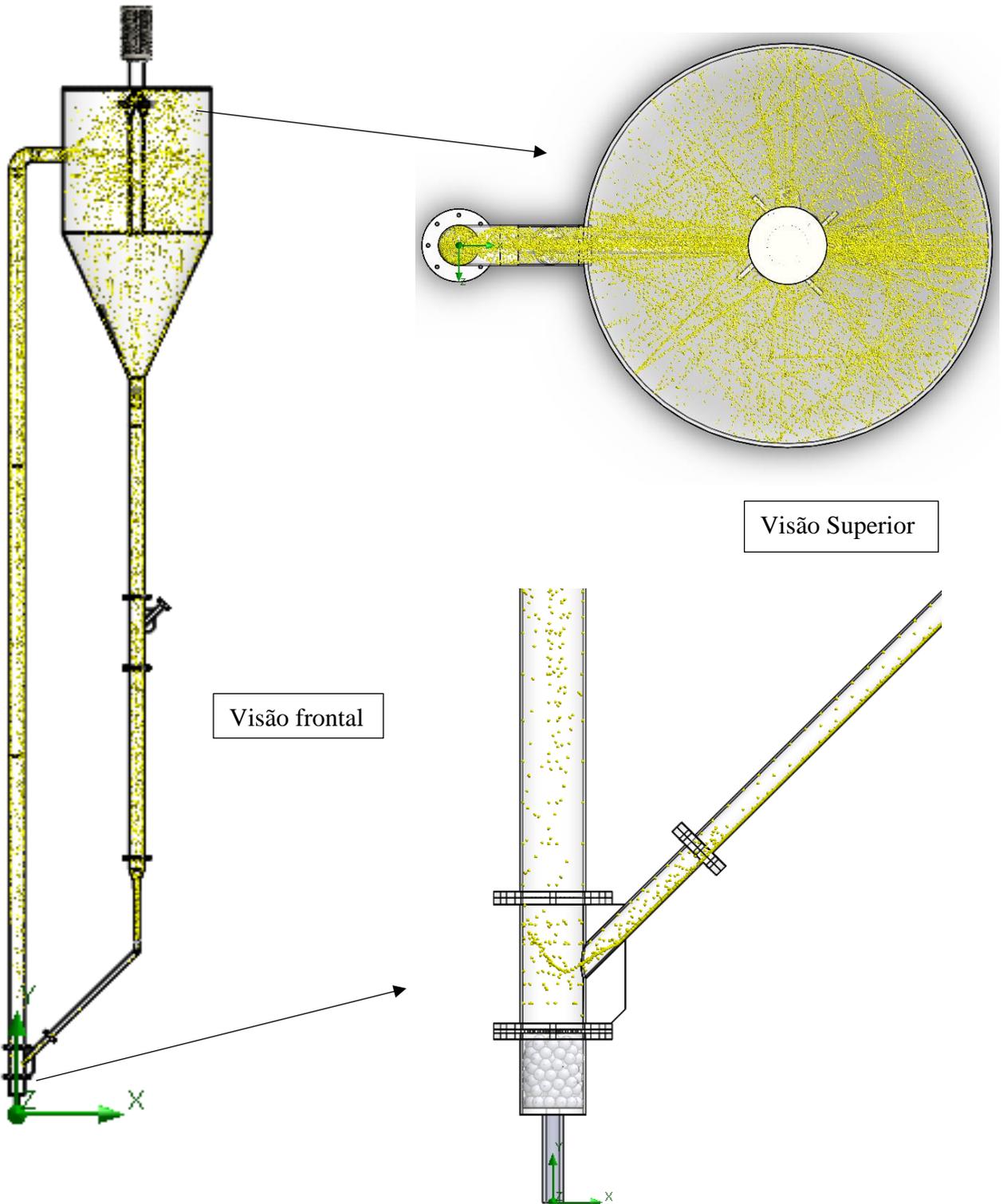
Figura 6 – Estrutura metálica da UPF



Fonte: Autoria própria 2022.

A última etapa, é a montagem de todas as peças, que foram nomeadas e numeradas para facilitar a montagem, com a ferramenta para encaixa das peças, foi montada toda a UPFV, ao termino da montagem 3D, deve-se investigar se não ficou alguma abertura ou uma peça com dimensão diferente maior ou menor, se caso isso ocorra, não ocorrerá simulação.

Figura 7 - Mostra Desenho em 3D do Riser com Fluxo de Sólidos Ascendente no ciclo do catalisador e detalhes da vista superior e base do riser



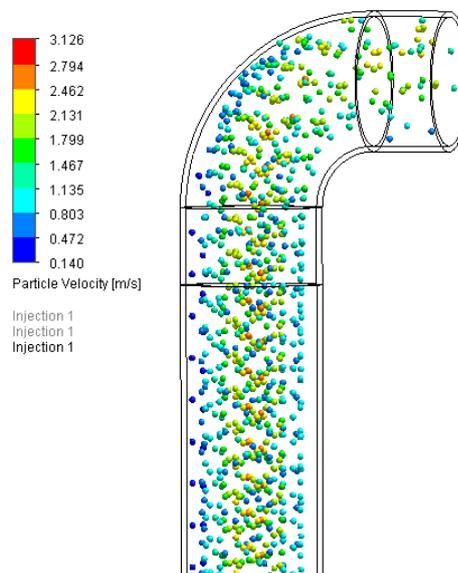
Fonte: Autoria própria 2022.

Tabela 2 - Componentes da UFPV

| COMPONENTES DA UFPV | |
|---------------------|----------------------|
| 1 | Base do <i>riser</i> |
| 2 | <i>Riser</i> |
| 3 | Câmara de separação |
| 4 | Ciclones |
| 5 | Coluna de retorno |
| | |

Fonte: Autoria própria 2022.

Figura 8 – Representação do fluxo bifásico em circulação na unidade virtual



Fonte: Autoria própria 2017.

O ângulo de 90 graus na entrada da câmara de separação, na Figura 8, é típico da geometria do reator de craqueamento de petróleo, e para estudar a influência desse ângulo é preciso avaliar, praticamente, todas as variáveis do processo. Foi simulado o fluxo de sólidos do sistema ar-catalisador no modelo 3D do SolidWorks para estudar o escoamento bifásico (Bertony, 2016).

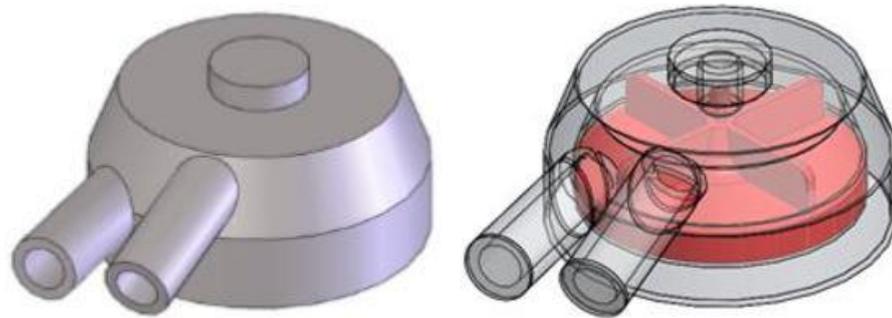
A metodologia de simulação com *SolidWorks* é encontrada na literatura como plataformas integradas de projeto mecânico com Desenho Auxiliado por Computador (CAD) e simulações numéricas (CAE), (Luciano Fuentes Leo, 2013). BOCK, E. et al. (2011).

4.2 Simulação CFD do Fluxo Bifásico na UPFV

A simulação do leito fluidizado circulante em unidades tipo FCC com reações de craqueamento ocorrendo a altas temperaturas é amplamente detalhada na literatura. A implementação da fluidodinâmica na UPFV, utilizou a capacidade computacional via CAD e o módulo CFD embestado no software SolidWorks, e recorreu as condições descritas em biorreatores e sistemas estudados na medicina, isto é, loop fechado em temperatura ambiente.

Luciano Fontes. et al (2013) construíram um modelo tridimensional de uma bomba de sangue centrífuga, ou um dispositivo de assistência ventricular (DAV) de fluxo contínuo como é o termo frequente. O intuito deste dispositivo foi atender às necessidades fisiológicas, melhorando a circulação com insuficiência cardíaca, (figura 9).

Figura 9 – Modelo tridimensional da câmara de bombeamento em CAD, medidas em milímetros

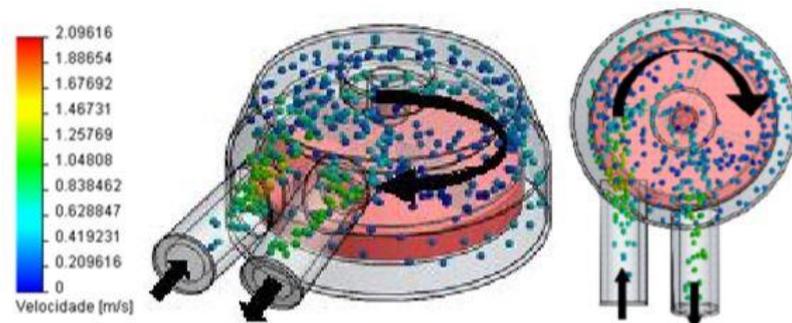


Fonte: Leo et al (2013).

É possível observar o fluxo no sistema. A ferramenta possibilita dois tipos de visualizações, uma em forma de linhas contínuas, e outra em forma de esferas, que facilita o entendimento, respectivamente, da movimentação do fluxo de sangue e das hemácias no modelo, que são indicados pelas setas pretas (Figura 10).

A velocidade de movimentação do fluido no sistema atinge o máximo com 2,096 m/s, porém o sistema apresenta principalmente a velocidade que varia de 0,209 m/s a 1,676 m/s. Abaixo é possível analisar o modelo, e pode-se assumir que as esferas são uma representação exagerada das hemácias, estudo que futuramente pode ser utilizado para a análise da hemólise no sistema, (Fig. 10). As cores representam alterações de velocidade ao longo da trajetória.

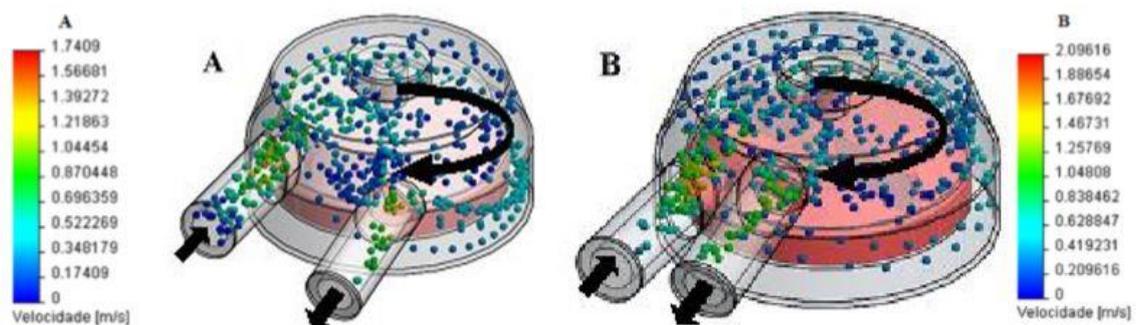
Figura 10 - Velocidade [m/s] de algumas partículas em determinados instantes simulados no interior da bomba



Fonte: Leo et al (2013).

Como pode ser observado abaixo, na Fig. 11, o escoamento foi simulado em geometrias diferentes (A e B), pela localização e inclinação das entradas e saídas na câmara de bombeamento, possibilitando a comparação de ambas do ponto de vista da velocidade do fluxo que é estimada na câmara de bombeamento. Os índices na bomba cardíaca B, pela velocidade do fluxo e o comportamento que apresenta valores médios e máximos, o que tende a evitar a formação de trombos (coagulação do sangue no interior da câmara) e circulação do sangue irregular.

Figura 11 – Simulação de fluxo no sistema em duas geometrias de entrada e saída diferentes (A e B)



Fonte: Leo et al (2013).

Luciano Leo et al (2013) utilizou *software SolidWorks* suas ferramentas *FloXpress* e *Flow Simulation* para a simulação computadorizada e resolução das equações de Navier-Stokes na câmara de bombeamento criada em 3D, a partir de um modelo matemático que relaciona a dinâmica dos fluidos, aplicando o Método de Volumes Finitos (MVF).

O *Flow Simulation* é o módulo de simulação da fluidodinâmica do SolidWorks. Este módulo é capaz de resolver diversos problemas relacionado ao escoamento de fluídos utilizando

as equações de Navier-Stokes, com a formulação das leis de massa, de momento e conservação de energia para o fluxo de fluidos. As equações são complementadas por equações de estado do fluido definindo a natureza do fluido, e por dependências empíricas de densidade do fluido, viscosidade e condutividade térmica na temperatura. O *Flow Simulation* é capaz de prever o escoamento de líquidos e gasosos laminares e turbulentos. A maioria dos escoamentos de fluidos encontrados na prática na engenharia são turbulentos, desta forma o *Flow Simulation* foi desenvolvido principalmente para simular e estudar sistemas de transporte turbulentos. Para prever escoamentos turbulentos, as equações de Navier-Stokes com médias são usadas, onde efeitos de tempo médio da turbulência de fluxo nos parâmetros de fluxo são considerados, considerando que os outros fenômenos dependentes do tempo, em grande escala, são tomados diretamente levados em consideração. Modelos de escoamento com parede fixa, onde a geometria do modelo não é alterada, são simulados introduzindo as condições de contorno iniciais. As leis de conservação para massa, momento angular e energia no sistema de coordenadas cartesianas, girando com velocidade angular Ω em torno de um eixo que passa pela origem do sistema de coordenadas, podem ser escritas na forma seguinte:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad i=1,2,3 \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H, \quad (1.3)$$

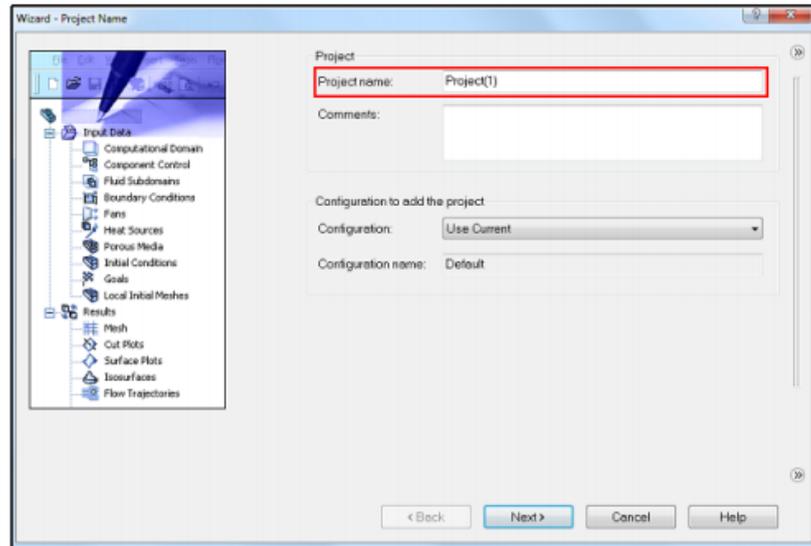
$$H = h + \frac{u^2}{2},$$

Onde v é a velocidade do fluido, ρ é a densidade do fluido, p é a pressão, S_i é uma força externa distribuída devido a uma resistência do meio poroso, h é a entalpia térmica, Q_H é uma fonte de calor ou sumidouro por unidade de volume, τ_{ij} é o tensor da tensão de cisalhamento viscoso, τ_{ij}^R é o tensor da tensão de Reynolds, q_i é o fluxo de calor difusivo. Os subscritos são usados para denotar a soma das três direções das coordenadas.

4.3 – Programação para Simulação.

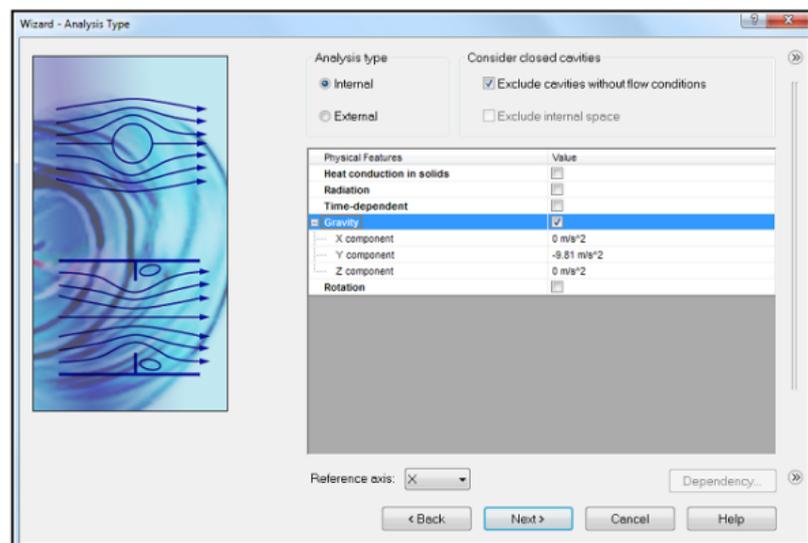
Para simulação do programa, temos etapas importantes como a criação do projeto, os tipos de análise, as condições iniciais, condições limites e as metas.

Figura 12 - Interface da criação do projeto



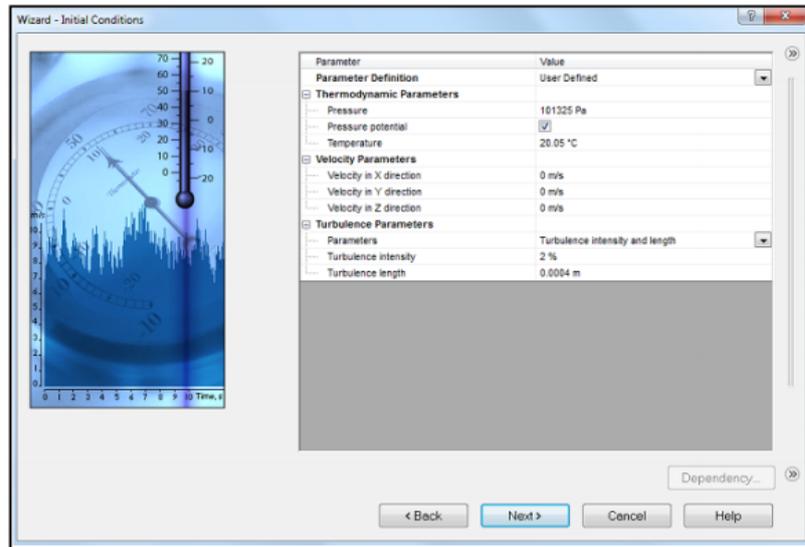
Na criação do projeto, é a nomeação para identificação da simulação, local onde ficará todos os dados de todos os parâmetros armazenados. Após simulação, podemos extrair cada parâmetro de interesse da fluidodinâmica

Figura 13 – Interface dos tipos de análise



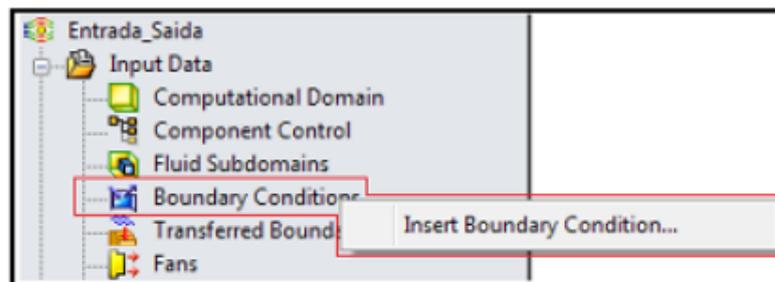
Já nos tipos de análise, escolhemos os dados par o fluxo circular na geometria interna da UPFV. E também escolhemos os fatores físicos, como efeito da gravidade.

Figura 14 – Interface das condições iniciais



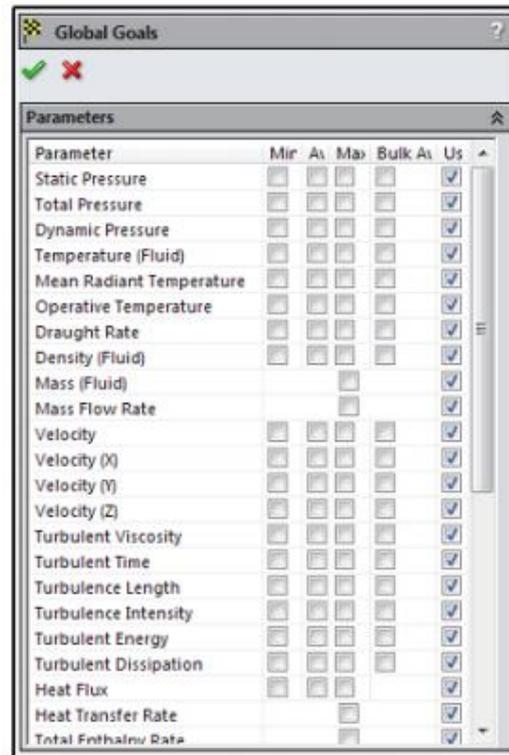
Nas condições iniciais, aplicamos os parâmetros para as condições exigidas no programa, tais como pressão e temperatura (ambiente).

Figura 15 – Interface condições limites



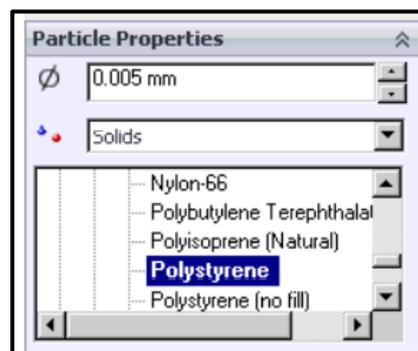
E as condições limites se aplica as regiões das entradas e saídas dos parâmetros estabelecidos, como por exemplo a vazão volumétrica e vazão mássica.

Figura 16 – Interface Metas



E as metas são aplicadas nas mesmas regiões das entradas e saídas, definindo os parâmetros que serão utilizados para gerar gráficos e bancos de dados.

Figura 17 – Interface do estudo da partícula



Nessa parte do programa, se faz a escolha da partícula sólida, adequada para simulação e posterior comparação com os dados experimentais. Foi escolhida na biblioteca do programa e mantida ao longo dos experimentos, uma partícula com densidade de 1150 Kg/m^3 e diâmetro de 80 micrometros. O catalisador de craqueamento que circula na planta física a UPF tem 1200 Kg/m^3 e diâmetro médio de 80 micrometros.

A Tabela 3, apresenta uma planilha com os dados para simular o fluxo com uma vazão de 650 L/min.

Tabela 3 - Condições para simulação da vazão de 650 L/min

| Condição inicial | | |
|------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Gravidade | 9,81m/s ² | 981cm/s ² |
| Pressão | 893,32 mmH ₂ O | 8759,9 Pa |
| Temperatura | 298 K | 25°C |
| Condição limite | | |
| Vazão volumétrica | 650 L/min. | 0,0108 m ³ /s |
| Vazão mássica | 0,6 Kg/min. | 0,01 Kg/s |
| Pressão entrada | 1485,32 mmH ₂ O | 14565,07 Pa |
| Pressão saída | 25,15 mmH ₂ O | 246,69 Pa |
| Partícula sólida | | |
| Densidade | Diâmetro | Polímero |
| 1150 Kg/m ³ | 80 µm | Nylon-66 |
| Metas | | |
| Superficial | Pressão total | |
| Superficial | Vazão volumétrica | |
| Superficial | Velocidade do fluxo | |
| Superficial | Velocidade (Y) do fluxo | |

Fonte: autoria do grupo de pesquisa 2019.

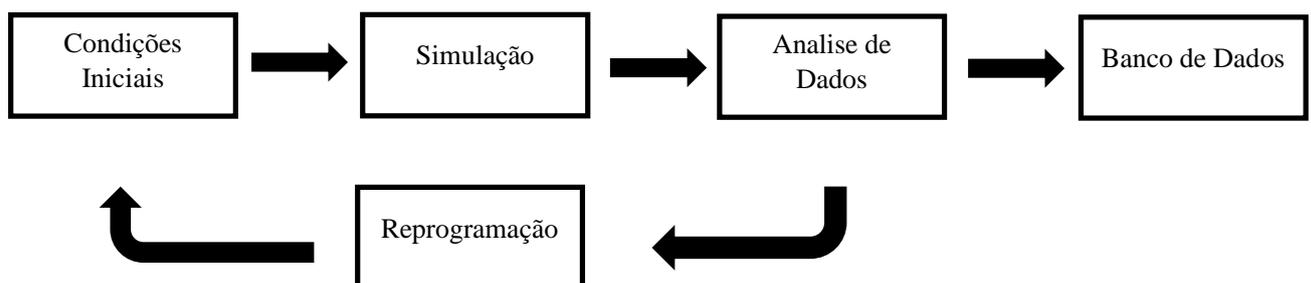
4.4 Análise de Dados e Precisão

Depois de analisar dados da simulação, em função da comparação com dados experimentais, novo planejamento de experimentos e reinício do estudo da simulação.

O programa tem recursos para fazer clonagens das simulações e iniciar novo experimento, sem precisar repetir todas as informações anteriores.

E a figura 18, esquematiza o processo para realizar as simulações.

Figura 18 – Procedimento para simulação CFD na planta virtual



Fonte: Autoria própria (2018)

O banco de dados é constituído pelas simulações aprovadas na análise de dados e que foram arquivadas na memória do programa. O experimento pode ser repetido, ou comparado, com nova simulação em condições iniciais variadas (reprogramação). Fica ainda disponível nos arquivos do banco de dados os recursos de recuperar valores da simulação numérica e gerar gráficos 2D e 3D ao longo do loop fechado na UPFV.

Os estudos dos perfis e dos parâmetros fluidodinâmicos seguem por meio de cálculos com as equações empíricas da Tabela 1, comparação com valores da literatura e métodos de ajuste aos dados experimentais obtidos na UPF. No processo de análise estatística dos dados, foi requerido o planejamento de Amostras de Referência, com o objetivo de conseguir resultados representativos. Assim cada experimento passou a ser realizado só em condições de operação reprodutíveis e as amostras coletadas nos medidores de pressão e intensidade da radiação, eram equivalentes no perfil axial das duas plantas UPF – UPFV. Com Amostras de Referência foi introduzido medidor de pressão abaixo da base do riser para controle da pressão que vem do compressor e a flexibilidade da simulação em 3D permitiu introduzir medidores de pressão para a adequada avaliação da diferença de pressão, ΔP no riser. Na sequência foram acrescentados pontos virtuais de coleta de amostra da pressão para avaliar a distribuição radial no riser da UPFV.

5 RESULTADOS

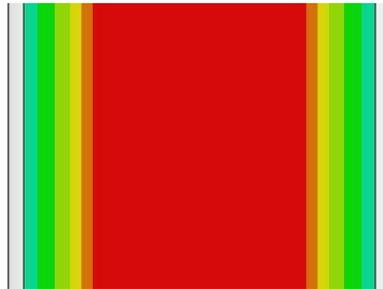
5.1 Amostragem de Referência

É o procedimento para a coleta de dados em experimentos padronizados de modo a obter reprodutibilidade nas medidas das variáveis na UPF, vazão de entrada de ar, pressão e intensidade gama. Esse procedimento é reproduzido na UPFV para comparação e então definir a coleta de dados para obter o perfil axial e radial na unidade virtual a UPFV.

O Perfil Axial foi definido na UPFV pelas medidas na altura dos sensores de pressão: PA, PB, PD, P1, P2, P3, e PF. A medida na altura do PD pode ser comparada com a medida da intensidade gama na UPF. O PA colocado abaixo da entrada no riser, antes do distribuidor, é medida de controle da pressão de operação.

A Figura 19 apresenta vista frontal do riser, com fluxo ascendente descrevendo o perfil axial.

Figura 19 - Perfil axial do fluxo bifásico

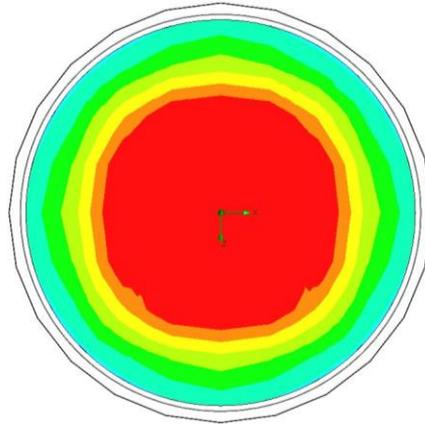


Fonte: autoria própria 2019.

Na Figura 19 as cores indicam intensidade do fluxo, que decrescem do centro para a parede do tubo-riser. Esta é uma condição típica do fluxo ascendente sem a ocorrência de recirculação de sólidos.

O Perfil Radial estudado na UPFV define cinco pontos de amostragem ao longo do raio. A secção transversal do riser é analisada nas alturas dos sensores de pressão os pontos de amostragem no perfil axial. A Figura 20 mostra a vista de uma secção transversal do riser.

Figura 20 - Secção transversal do riser com fluxo bifásico



Fonte: autoria própria 2022.

A Figura 20 representa a intersecção do cilindro-riser com o plano xy. A imagem indica que o centro do cilindro coincide com a origem do sistema de coordenadas. As cores representam intensidade do fluxo que descrece do centro para a parede do riser.

5.2 Similaridade funcional da UPFV

A similariedade geométrica e similariedade funcional foram estudadas na UPF por Moura, et. al. (2015). Experimentos com simulações da pressão axial ao longo do riser foram realizadas em estudos da similaridade funcional da UPFV em trabalhos prévios, Claudino, et al (2018), Bertony, et al (2016), comparando estes perfis com dados experimentais e dados da literatura. Agora investigamos a distribuição axial da pressão, Na Tabela 4 valores da pressão medidos em cada simulação, nas condições de operação definida com três entradas de ar no riser.

Tabela 4 – Distribuição axial da pressão no riser com três vazões volumétricas, dados simulados

| DADOS DAS PRESSÕES SIMULADAS | | | | |
|-------------------------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| Alturas | Sensores | 650 L/min | 675 L/min | 700 L/min |
| 0,24 m | PA | 14565,07189 Pa | 15381,93319 Pa | 16474,58946 Pa |
| 0,79 m | PB | 336,6908221 Pa | 395,0154316 Pa | 397,999195 Pa |
| 1,26 m | PD | 337,4966456 Pa | 392,1368067 Pa | 396,4495419 Pa |
| 2,13 m | P1 | 324,1655812 Pa | 369,8262255 Pa | 378,4554684 Pa |
| 4,18 m | P2 | 275,8357264 Pa | 295,0622639 Pa | 305,9891879 Pa |
| 6,03 m | P3 | 246,6954545 Pa | 248,7115875 Pa | 250,5043962 Pa |
| 6,71 m | PF | 246,3908959 Pa | 248,5461559 Pa | 248,5757661 Pa |

Fonte: autoria própria 2022.

Os valores na Tabela 4 foram comparados com dados experimentais obtidos na UPF nas mesmas condições de operação, isto é, nas três vazões volumétricas. Os dados na Tabela 5.

Tabela 5 - Distribuição axial da pressão no riser com três vazões volumétricas, dados experimentais

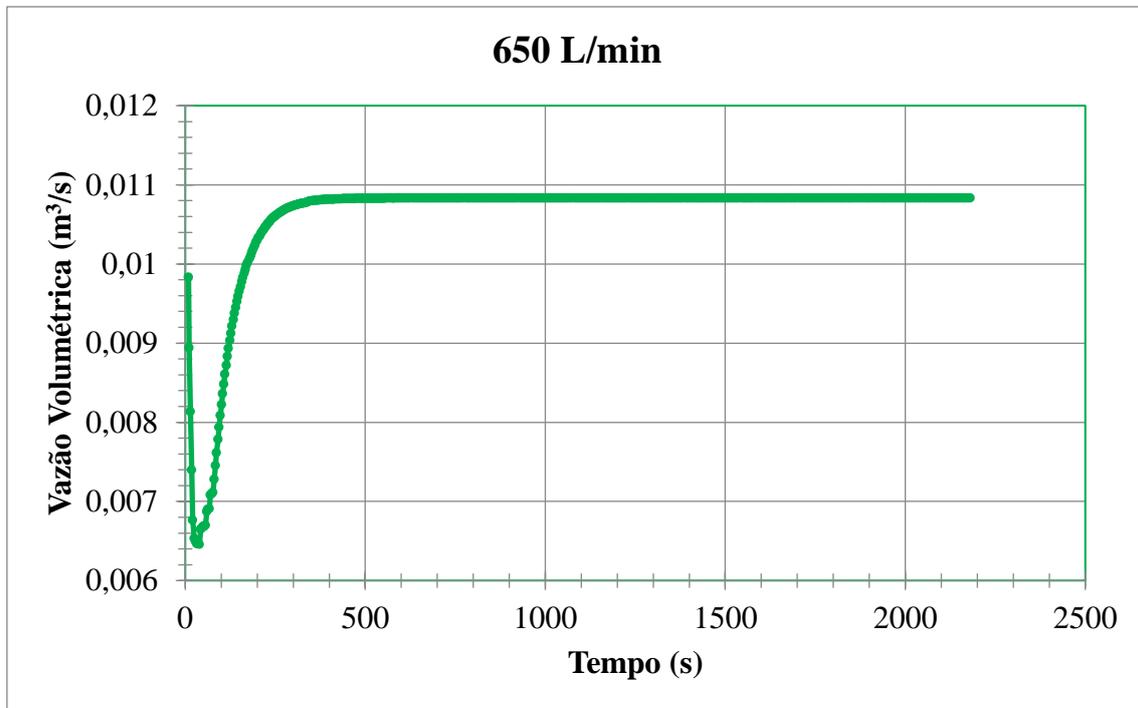
| DADOS DAS PRESSÕES EXPERIMENTAIS | | | | |
|---|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| Alturas | Sensores | 650 L/min | 675 L/min | 700 L/min |
| 0,24 m | PA | 14589,07 Pa | 15407,77 Pa | 16501,43 Pa |
| 0,79 m | PB | 399,49 Pa | 407,34 Pa | 402,73 Pa |
| 1,26 m | PD | | | |
| 2,13 m | P1 | 345,07 Pa | 354,97 Pa | 357,03 Pa |
| 4,18 m | P2 | 301,92 Pa | 311,53 Pa | 323,2 Pa |
| 6,03 m | P3 | 249,66 Pa | 260,44 Pa | 263,58 Pa |
| 6,71 m | PF | | | |

Fonte: Oliveira 2018.

As variáveis independentes do sistema são a entrada de ar comprimido e a injeção de sólidos que podem ser visualizados na Figura 7, em detalhe na base do riser. As entradas de ar correspondem aos valores estudados na UPF: 650 L/min, 675 L/min e 700 L/min, com esses

valores foram realizados experimentos de simulação na UPFV. A simulação da vazão volumétrica com a vazão de entrada de ar com 650 L/min está no gráfico da Figura 26.

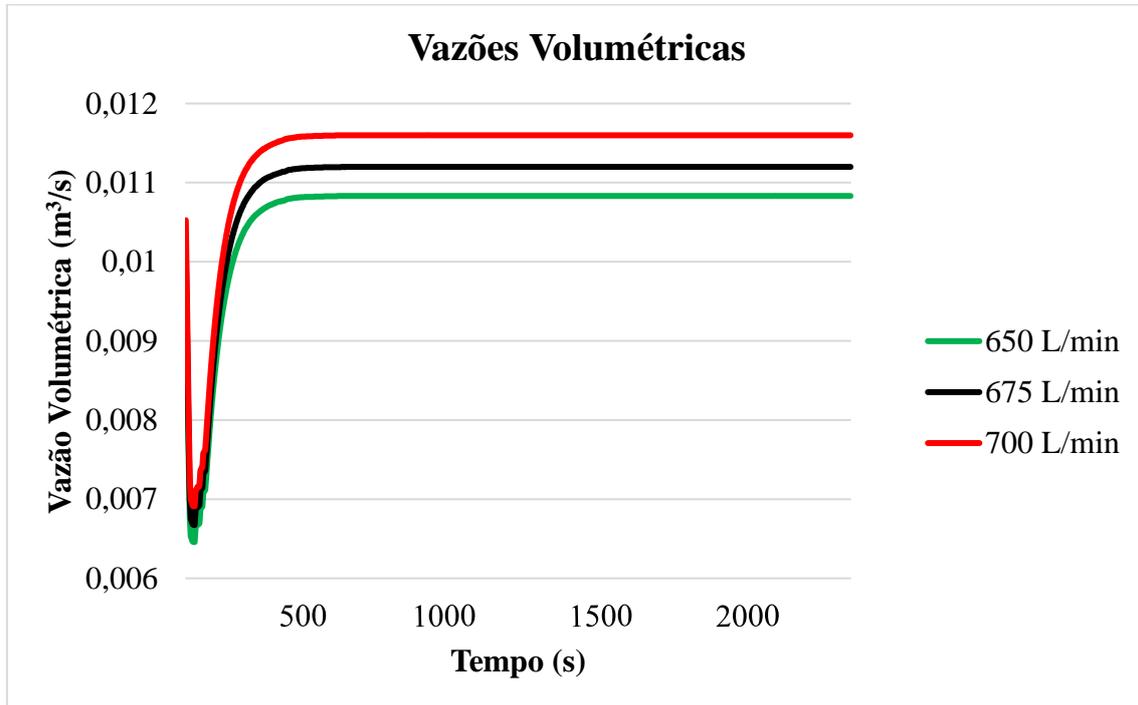
Figura 21 - Vazão volumétrica com vazão de entrada de ar de 650 L/min



Fonte: autoria própria 2020.

Observamos na Figura 21 a vazão volumétrica em função do tempo de operação, no início temos grandes oscilações, a estabilização do sistema ocorre com cerca de 380 s de operação. Em seguida a simulação, o gráfico vazão volumétrica versus tempo é disponibilizado pelo software Solidworks. A simulação apresentada na Figura 21 foi realizada apenas com a variável independente básica da condição de operação da planta piloto, sendo neste caso o ar. Esta condição é fundamental para teste preliminar e sua reprodutibilidade é requerida antes de analisar a operação com sólidos. A Figura 22 apresenta os gráficos com as três entradas de ar estudadas.

Figura 22 - Vazão volumétrica em função da vazão de entradas de ar



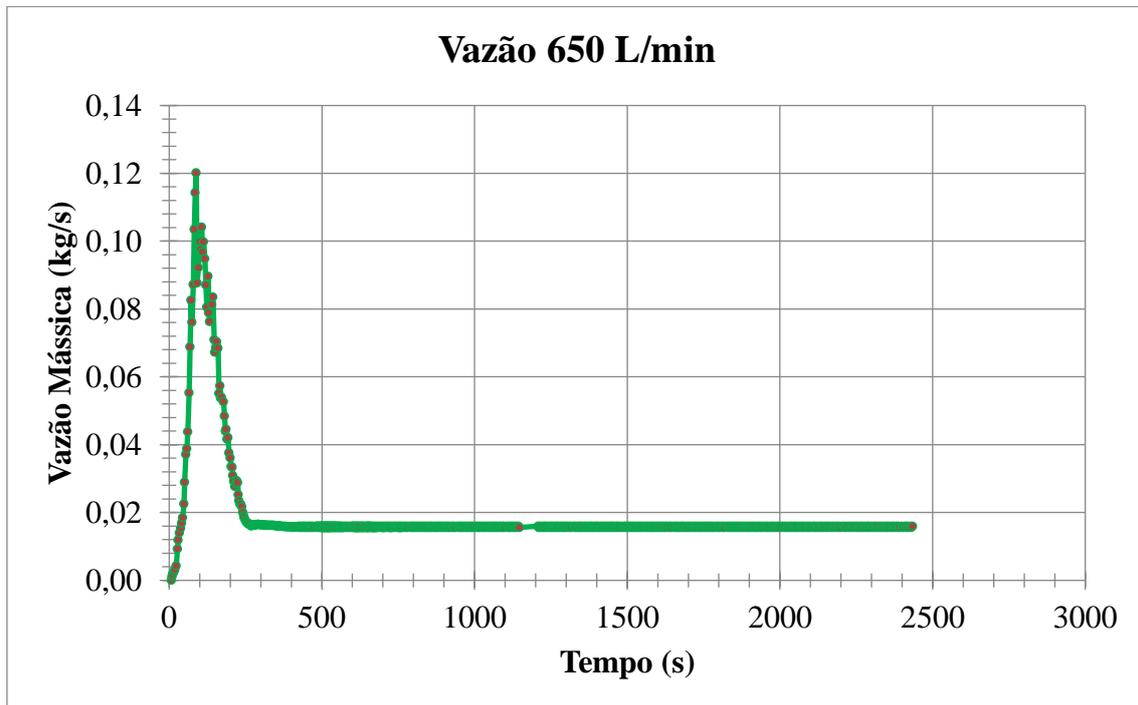
Fonte: autoria própria 2022.

Na Figura 22 podemos observar a vazão volumétrica em função do tempo, para três valores da vazão, as curvas estão supostas na região de 0 até cerca de 380 s, corresponde ao tempo que o sistema leva para se estabilizar. Em seguida as curvas ficam distintas, bem definidas e estatisticamente reprodutíveis para cada condição de operação.

A injeção de sólidos é realizada por meio da válvula VPC, a entrada do catalisador na base do riser pode ser observada na Figura 7. O sistema já está em operação com uma determinada entrada de ar e com a correspondente vazão volumétrica, com a abertura automática da válvula o sólido cai por gravidade no riser, aí ocorre a fluidização com a entrada de ar, e em seguida ascende no riser e circula no sistema.

A simulação da vazão mássica que entra no riser foi realizada com injeção de sólido constante. Os experimentos foram realizados com os mesmos valores de entrada de ar apresentadas na Figura 22, e os resultados podem ser vistos nas Figuras 23 e 24.

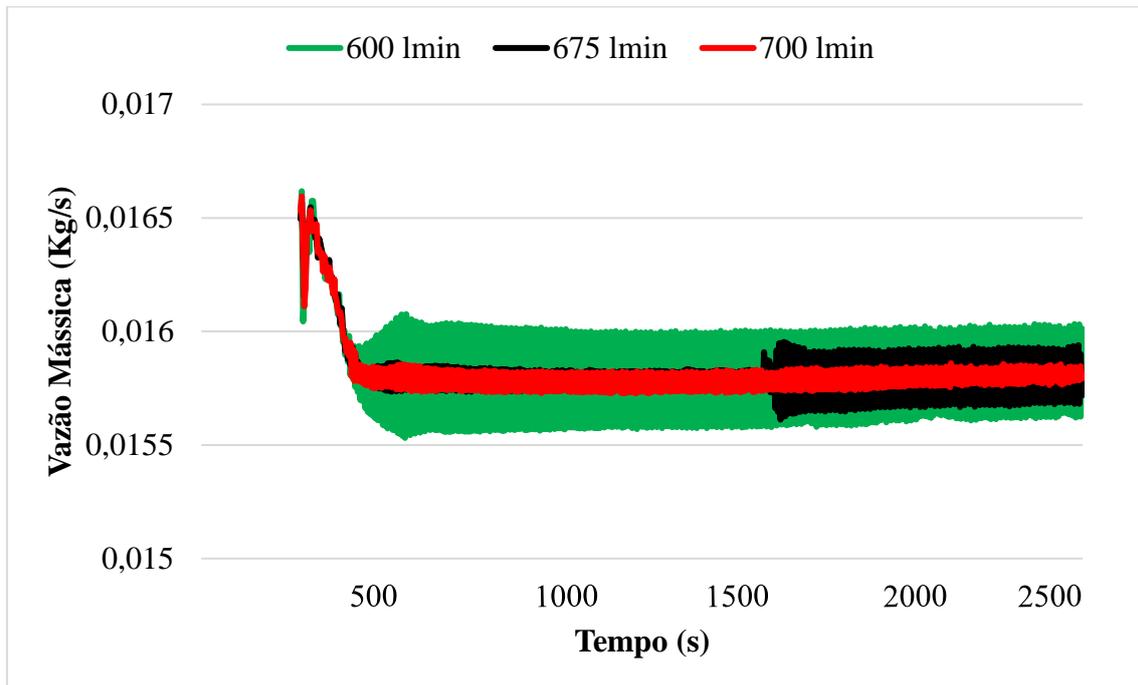
Figura 23 – Vazão mássica com vazão de entrada de ar de 650 L/min



Fonte: autoria própria 2020.

O Gráfico da vazão mássica versus tempo de operação começa de 0 até cerca de 290 s observamos oscilações e em seguida a vazão mássica estabiliza em torno do valor de 0,016 Kg/s. Os experimentos com entrada de sólido constante e a entrada de ar com valores de 675 L/min e 700 L/min tiveram comportamento similar a este com entrada de ar de 650 L/min. Para visualizar as variações da vazão mássica com as três entradas de ar estudadas, apresentamos os três gráficos na Figura 24.

Figura 24 - Vazão Mássicas e com três vazões de entrada de ar



Fonte: autoria própria 2020.

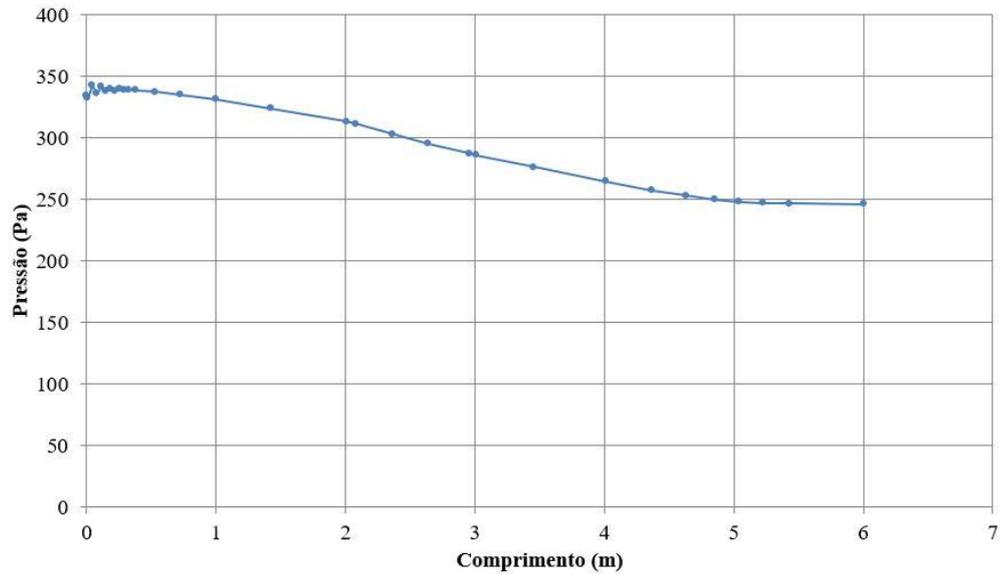
Na Figura 24, a vazão mássica começa a partir de 250 s e na região de estabilização aparecem as oscilações das três entradas de ar 650 L/min, 675 L/min e de 700 L/min cujos gráficos estão sobrepostos. Podemos observar, em vermelho, um valor da vazão mássica abaixo de 0,016 Kg/s, como esperado. A visualização desses gráficos disponibilizados pelo software permite uma melhor compreensão do processo de fluidização. Uma região do riser difícil de coletar dados experimentais e cujos modelos teóricos se afastam dos experimentos em diversos trabalhos, segundo Davidson, 2000.

Vale considerar, que o gráfico da Figura 23, começa no tempo zero da operação com a injeção de sólido, na intersecção do riser com a coluna de retorno. Na literatura é difícil encontrar dados dessa região de turbulência em trabalhos de simulação CFD só do riser, em comparação com estudos do full-loop, (Tingen Li et. al, 2014). Na mesma direção, o estudo do fluxo em toda unidade piloto, a simulação do full-loop, é apresentado por (Min Wang et al. 2019). Não encontramos informações claras sobre o processo de fluidização, como pode ser observado nos gráficos das Figuras 23 e 24. A Figura 25, apresenta a pressão no riser a partir da entrada na base do tubo.

5.3 – Caracterização do perfil axial na UPFV

5.3.1 – Pressão

Figura 25 - Pressão ao longo do riser com a vazão de 650 L/min

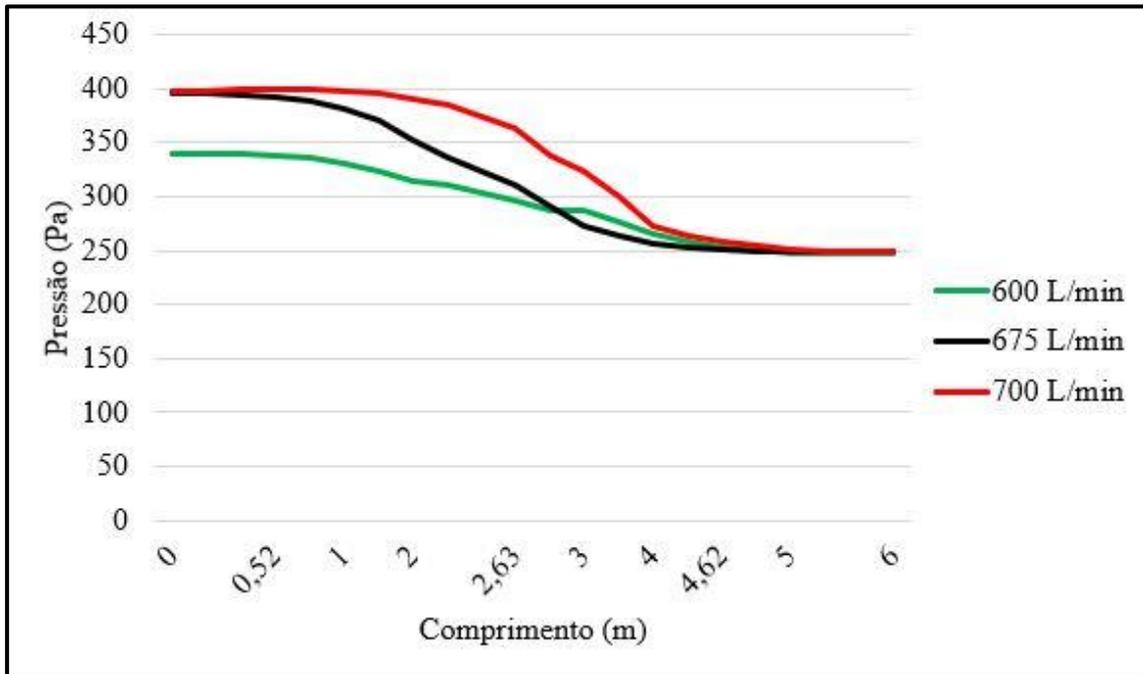


Fonte: autoria própria 2019.

O Gráfico da pressão em Pascal distribuída ao longo do comprimento do riser em metros, para a entrada de ar de 650 L/min, apresenta a região de turbulência abaixo da altura de 1 m, e acima vemos um comportamento característico da pressão.

Os gráficos com as entradas de ar no riser de 675 L/min e 700 L/min mostram também comportamento característico da distribuição da pressão no riser como na Figura 26, com valores mais altos diretamente proporcionais as entras de ar, como é esperado. Esses gráficos estão apresentados na Figura 26.

Figura 26 - Pressão ao longo do riser com três vazões de entrada de ar



Fonte: autoria própria 2020.

Nessa Figura 26, os três gráficos apresentam os três perfis de pressão, ao longo do comprimento do riser, para as três entradas de ar estudadas. Observa-se aqui o comportamento mais geral da distribuição da pressão em função da vazão de entrada de ar no riser. Os perfis são mais diferenciados na região em que os valores da pressão são mais altos. As oscilações provenientes da região de turbulência até 1 m de altura estabilizam e os valores ficam bem diferenciadas até 3 metros do riser, mais acima, a queda de pressão na região mais alta aproxima os valores das três curvas.

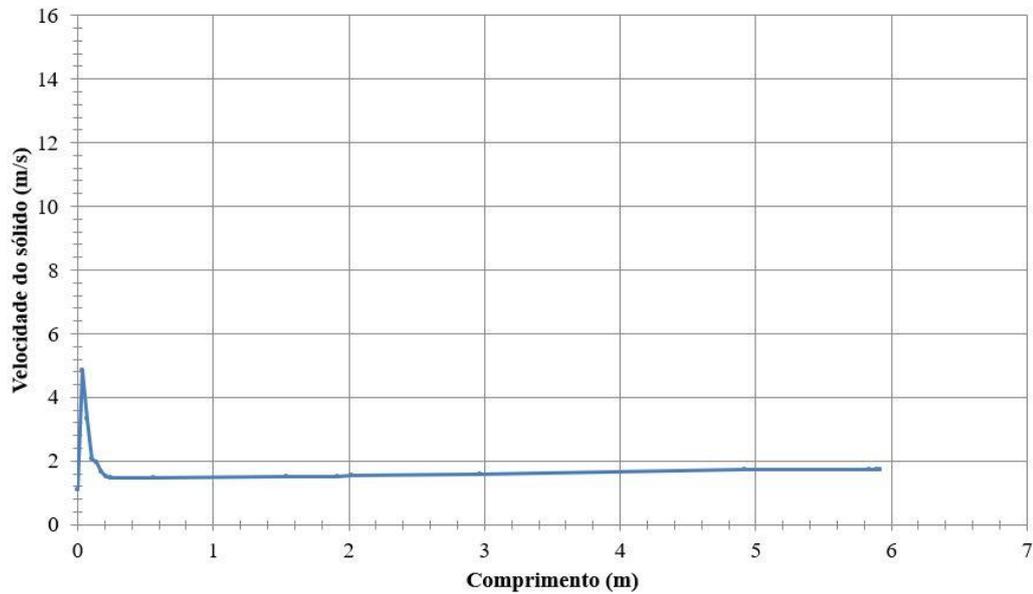
Na Figura 26, as pressões no início entre a altura de 0 até 4 metros, nota-se a diferença entre as curvas em cada vazão de ar, mas, quando os valores das pressões estão entre 5 e 6 metros, fica mais difíceis de observar a correspondência entre os valores da pressão e a entrada de ar no sistema. O que visualizamos nessa figura, é bem caracterizado na literatura para o perfil de pressão ao longo do riser no sistema de fluxo bifásico circulante (Davidson, 2005).

5.3.2 Velocidade de sólido

Os experimentos realizados para estudar a velocidade da fase sólida ao longo do riser seguem a mesma estratégia de avaliar a velocidade em função da vazão de entrada para os

valores de 650 L/min, 675 L/min e 700 L/min. A Figura seguinte descreve a velocidade do sólido no sistema de leito fluidizado circulante com uma vazão de entrada de ar de 650 L/min.

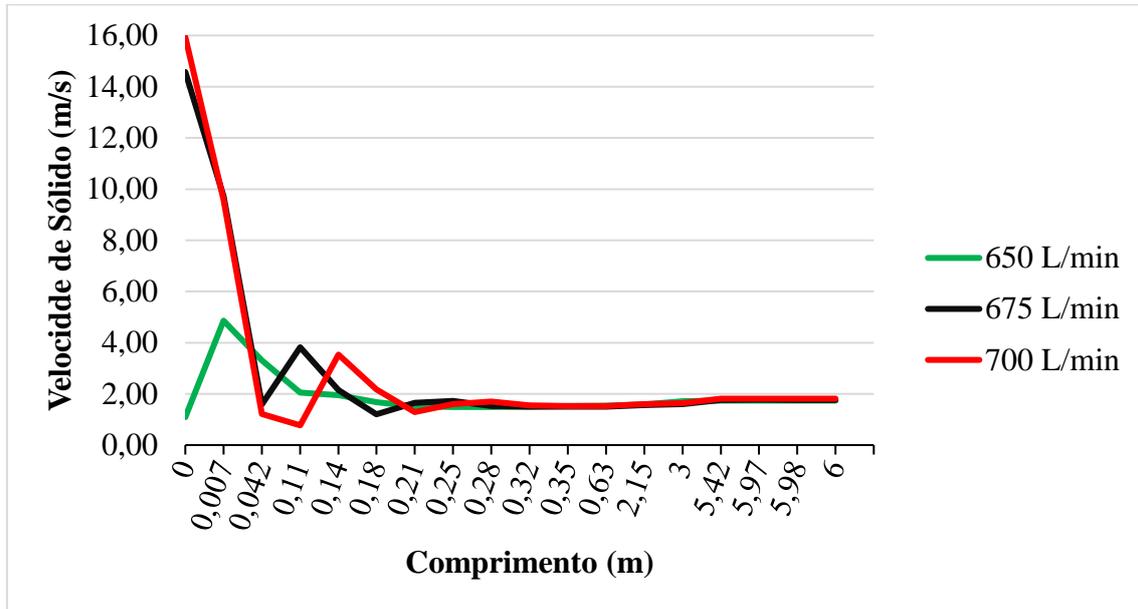
Figura 27 - Velocidade de sólido na região do riser com a vazão 650 L/min



Fonte: autoria própria 2019.

Na Figura 27, velocidade do sólido distribuída ao longo do comprimento do riser apresenta oscilação no início, acima de 0.4 m ocorre a estabilização com valores crescentes até o topo do riser. Continuando o estudo com as simulações com os valores de vazão de entrada de ar com 675 L/min e 700 L/min, observamos que os gráficos apresentam o comportamento esperado, equivalente ao gráfico da Figura 27, com valores da velocidade em m/s crescendo em função dos valores da vazão de entrada de ar. Para visualizar isso, Na Figura 28, os três gráficos dos perfis de velocidade de sólido com as três vazões estão apresentados.

Figura 28 - Velocidade de sólido em função das vazões de entrada de ar

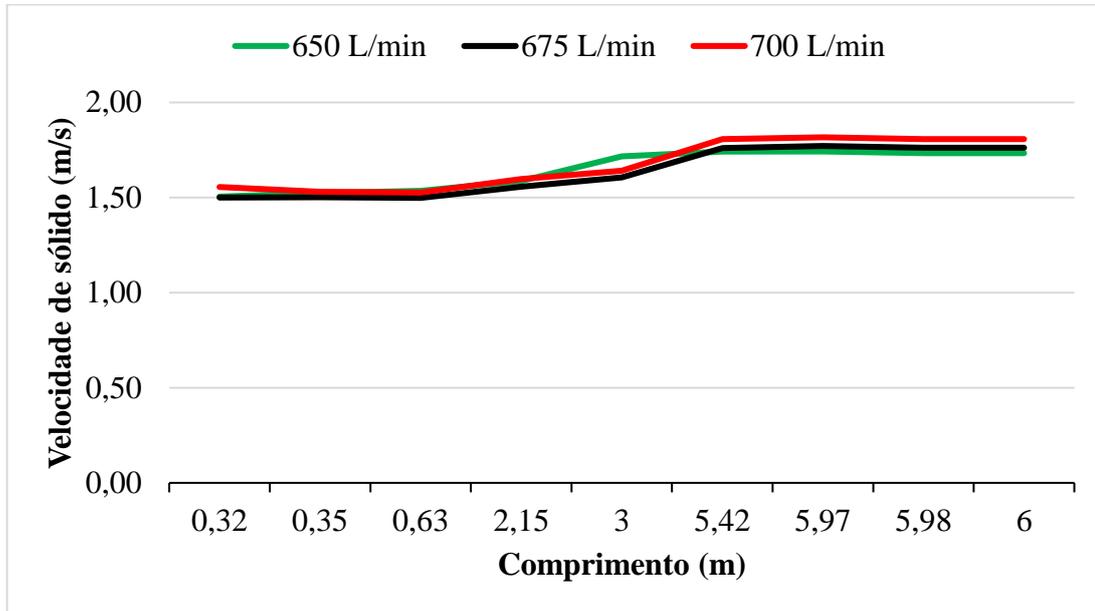


Fonte: autoria própria 2020.

A Figura 28, mostra os três gráficos de velocidade versus comprimento do riser, com as três vazões estudadas. Grandes oscilações até 0,042 m depois vem uma região de transição até 0,21 m e acima de 1 m as curvas ficam mais estáveis, com a velocidade do sólido crescendo até o final do riser.

Para mostrar a diferença nos valores da velocidade de sólido crescendo ao longo do riser, apresentamos os mesmos gráficos a partir da região na qual os valores da velocidade ficam mais estáveis, conforme apresenta a Figura 29.

Figura 29 - Velocidade de sólido com três vazões volumétricas de ar

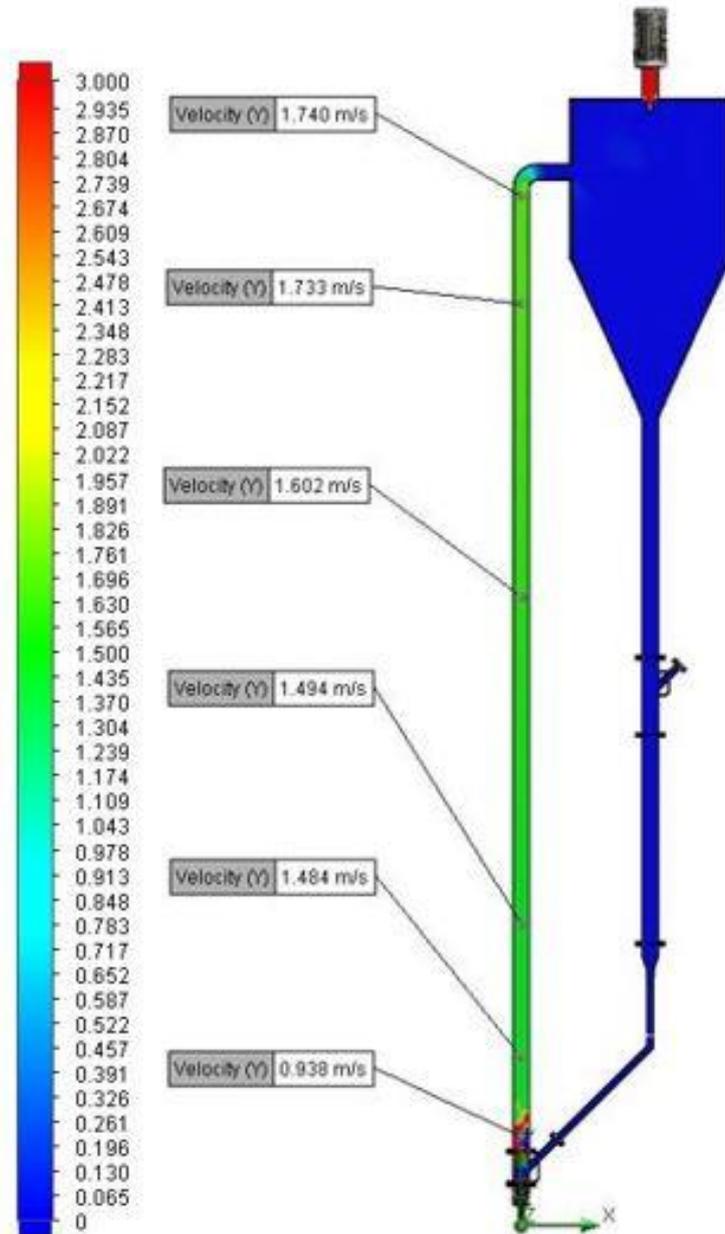


Fonte: autoria própria 2020.

Na Figura 29, a velocidade da fase sólida ao longo do riser pode ser comparada com a Figura 28, inicia a partir de 0,30 m e observa-se que acima de 5,42 m a velocidade do sólido cresce até o final do riser, com valores maiores de acordo com a vazão de ar.

Para visualizar a velocidade do sólido ao longo do riser em função da vazão de entrada de ar, a Figura 30 apresenta o ciclo do catalisador, riser, vaso de separação das duas fases, com filtro no topo, coluna de retorno com válvula de injeção de sólido na base do riser.

Figura 30 - Velocidade de sólido medida em circulação no riser com vazão de 650 L/min



Fonte: autoria própria 2019.

Na Figura 30 vemos os componentes da unidade do CBF leito fluidizado circulante, o ciclo do catalisador, com o eixo x na parte inferior indicando a orientação no sistema de coordenadas, e a esquerda o intervalo da velocidade em cores. Ao longo do riser estão indicados os pontos de coleta com os valores da velocidade na altura dos sensores dos pressão. Os valores da velocidade de sólido correspondem a vazão de ar de 650 L/min e podem ser correlacionados com os valores da Figura 27.

A Figura 30 mostra a distribuição axial da velocidade de sólidos, a simulação em CFD do escoamento das duas fases sólido e ar, é realizada na geometria 3D gerada pelo software Solidworks. Observamos na Figura 30, o ciclo do catalisador simulado no full-loop, e visualizamos a distribuição da velocidade do sólido ao longo do volume do riser.

Seguido a mesma sequência no estudo dos perfis de parâmetros fluidodinâmicos, analisando os gráficos com as vazões de 675 L/min e 700 L/min, observamos que a velocidade do sólido tem comportamento equivalente a esse da Figura 30. Os valores da velocidade do sólido com as três vazões estão listados na Tabela 6.

Tabela 6 – Velocidade de sólido, dados simulados das três vazões volumétricas

| Velocidade de Sólido, Dados Simulados | | | | |
|--|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Alturas | Sensores | 650 L/min. | 675 L/min. | 700 L/min. |
| 0,24 m | PA | | | |
| 0,79 m | PB | 0,938 m/s | 1,012 m/s | 1,084 m/s |
| 1,26 m | PD | 1,484 m/s | 1,499 m/s | 1,527 m/s |
| 2,13 m | P1 | 1,494 m/s | 1,516 m/s | 1,546 m/s |
| 4,18 m | P2 | 1,602 m/s | 1,637 m/s | 1,673 m/s |
| 6,03 m | P3 | 1,733 m/s | 1,758 m/s | 1,803 m/s |
| 6,71 m | PF | 1,740 m/s | 1,764 m/s | 1,810 m/s |

Fonte: autoria do grupo de pesquisa 2019.

Para validar os perfis dos parâmetros fluidodinâmicos simulados precisamos comparar com valores experimentais, com outros métodos de medida e definir critérios de avaliação. Usamos as equações básicas da fluidodinâmica para calcular a velocidade de sólidos. Para calcular a velocidade coma equação de Davidson 2000, precisamos de valores da fração volumétrica de sólidos que foi calculada com a equação de Luckos 2005, obtendo os valores listados na Tabela 7.

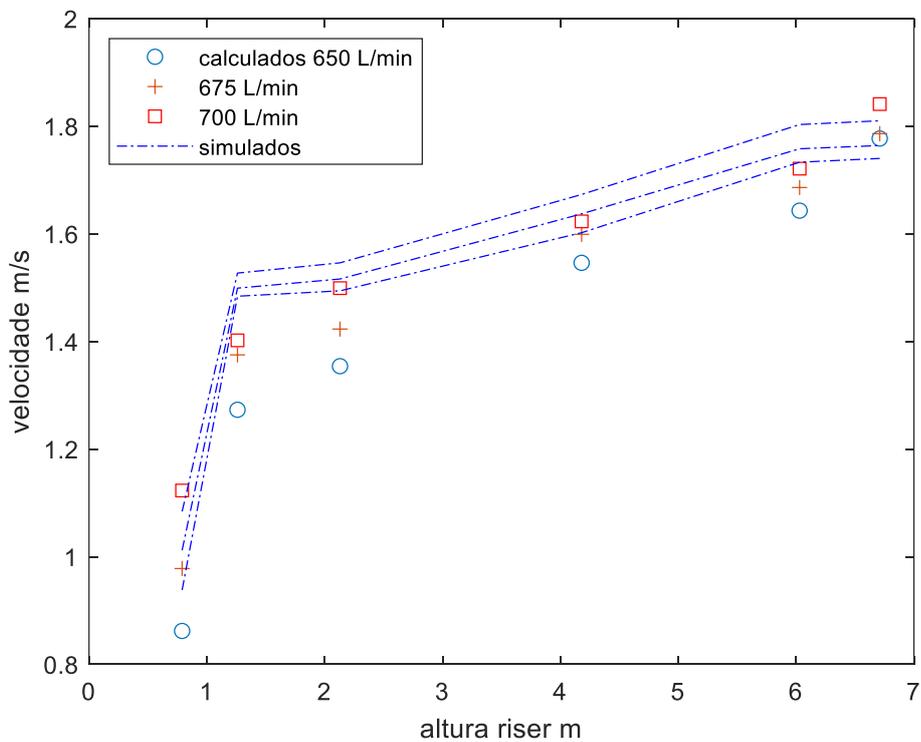
Tabela 7 – Velocidade de sólido calculada para três vazões volumétricas

| Velocidade de sólido, dados calculados | | | | |
|--|----------|------------|------------|------------|
| Alturas | Sensores | 650 L/min. | 675 L/min. | 700 L/min. |
| 0,24 m | PA | | | |
| 0,79 m | PB | 0,862 m/s | 0,978 m/s | 1,123 m/s |
| 1,26 m | PD | 1,273 m/s | 1,375 m/s | 1,402 m/s |
| 2,13 m | P1 | 1,354 m/s | 1,423 m/s | 1,499 m/s |
| 4,18 m | P2 | 1,546 m/s | 1,599 m/s | 1,623 m/s |
| 6,03 m | P3 | 1,643 m/s | 1,686 m/s | 1,721 m/s |
| 6,71 m | PF | 1,777 m/s | 1,786 m/s | 1,841 m/s |

Fonte: autoria do grupo de pesquisa 2019.

Para comparar a velocidade do sólido ao longo do riser com os dados simulados e calculados das Tabelas 6 e 7, a Figura 31 apresenta os gráficos com dados da velocidade coletados na altura dos sensores de pressão.

Figura 31 - Velocidade do sólido simulada e calculada com três vazões de entrada



Fonte: autoria própria 2020.

Na Figura 31, observamos a velocidade do sólido versus altura do riser com valores simulados e calculados em função das três vazões de ar. Os gráficos mostram que a velocidade do sólido cresce ao longo do riser e também cresce com a vazão de entrada de ar no riser. Nas Tabelas 6 e 7, estão os dados que podem caracterizar a velocidade do sólido em função da vazão de entrada. Observamos que existe concordância dos dois perfis, mas, precisamos de uma avaliação estatística para definir se os pontos estão suficientemente próximos ou não, e finalmente de um critério estatístico para validação.

5.3.3 – Diferença de pressão ΔP .

Vamos considerar a diferença de pressão, o ΔP no riser, que é um parâmetro de caracterização do sistema, o ΔP calculado com o perfil de pressão. Com os dados da Tabela 4, calculamos o ΔP para a vazão de ar, os dados são apresentados na Tabela 8.

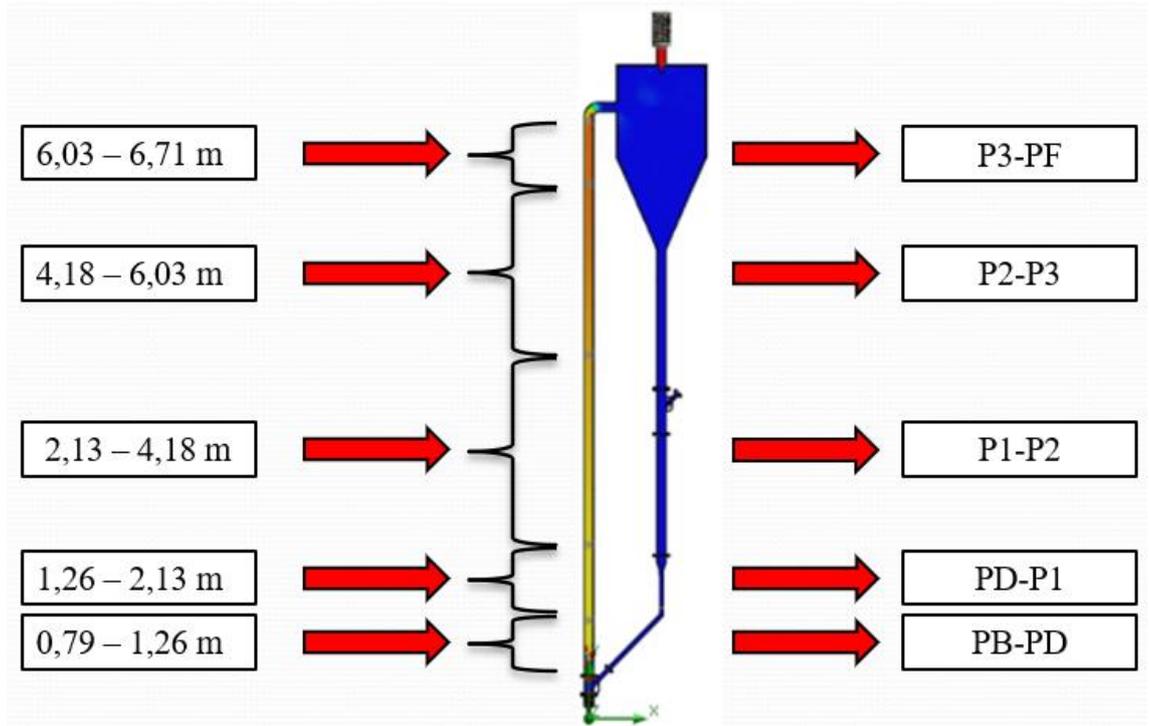
Tabela 8 - Diferença de pressão no riser em função da vazão de entrada de ar

| Diferença de pressão ΔP (Pa) | | | | |
|--|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| Alturas m | Sensores | 650 L/min | 675 L/min | 700 L/min |
| 0,79 - 1,26 | PB - PD | 0,8060 | 2,878 | 1,549 |
| 1,26 - 2,13 | PD - P1 | 13,331 | 22,310 | 17,995 |
| 2,13 - 4,18 | P1 - P2 | 48,330 | 74,764 | 72,466 |
| 4,18 - 6,03 | P2 - P3 | 29,141 | 46,351 | 55,485 |
| 6,71 - 6,03 | P3 - PF | 0,304 | 0,1650 | 1,9280 |

Fonte: autoria do grupo de pesquisa 2019.

Para mostrar a distribuição do ΔP no riser da UPFV, a Figura 32 apresenta o riser e os intervalos correspondentes ao valor do ΔP .

Figura 32 - Diferença de pressão medido no perfil de pressão do riser



Fonte: autoria própria 2020.

Na Figura 32, observamos os intervalos definidos para estudar a queda de pressão DP, ao longo do riser, os pontos de coleta são os sensores de pressão, cujas posições estão visíveis na Figura 30. O ΔP foi medido com o fluxo bifásico em circulação na unidade UPFV.

O ΔP Total no riser em função da entrada de ar está na Tabela 9.

Tabela 9 - ΔP total no riser em função da vazão de entrada de ar

| Vazão L/min | 650 | 675 | 700 |
|---------------|--------|---------|---------|
| ΔP Pa | 90,300 | 146,469 | 149,423 |

Fonte: autoria própria 2020.

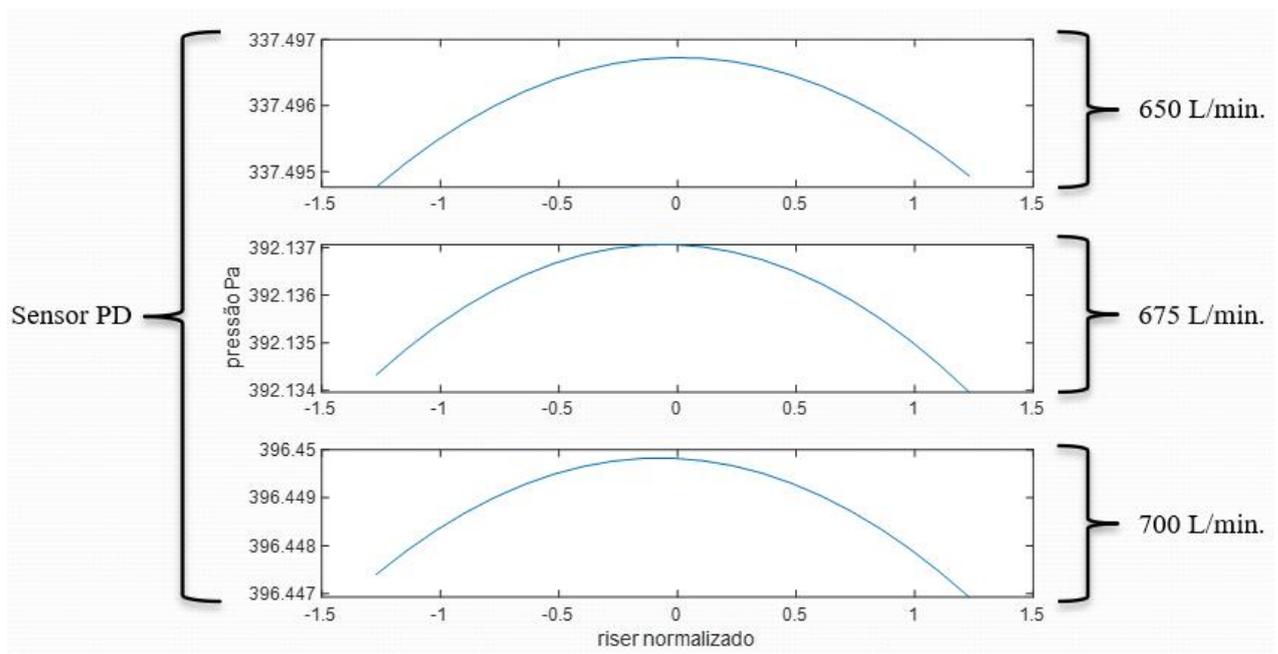
O ΔP no riser é uma informação utilizada na literatura para caracterizar as condições de operação no leito fluidizado circulante, o trabalho de (Gidaspow, D. 1994), é ainda hoje referência. É informação básica na caracterização do fluxo bifásico, por meio das equações fundamentais dadas na Tabela 1, podemos calcular a fração volumétrica de sólidos, e a concentração de sólidos kg/m^3 no riser.

O ΔP foi utilizado recentemente como forma de fazer uma avaliação básica no estudo do Full-loop (Min Wang, 2019). Nesse contexto a medida do DP no riser da UPFV é fundamental para a avaliação da similaridade funcional.

5.4 – Caracterização do perfil radial na UPFV

5.4.1 – Pressão

Figura 33 - Distribuição radial da pressão em função da vazão volumétrica de entrada



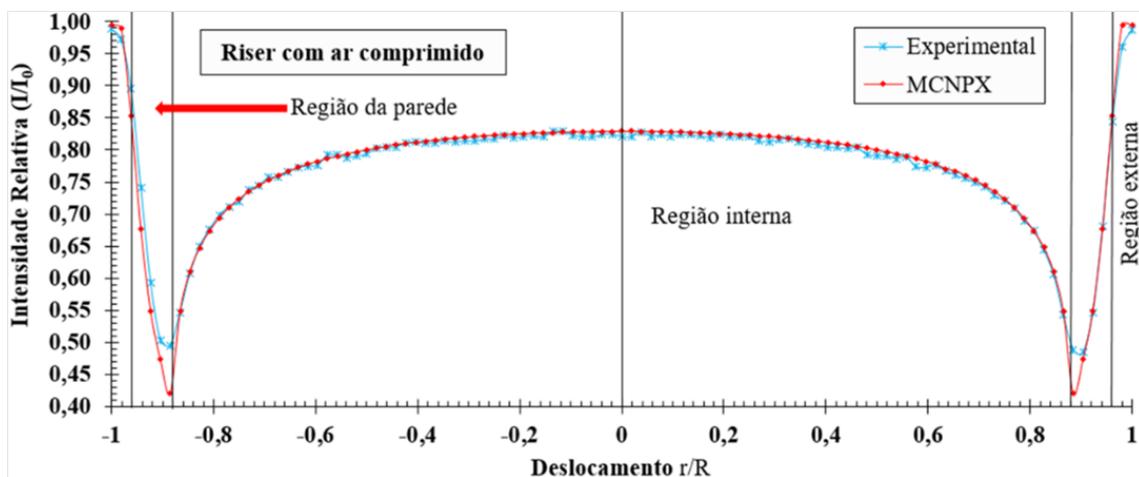
Fonte: autoria própria 2020.

Na Figura 33, podemos visualizar a pressão em unidades de Pa que aumenta com a vazão de ar de 650 /min no gráfico de cima, para a vazão de 675 L/min no centro até o gráfico em baixo com vazão de 700 L/min. As curvas representam modelos de ajuste aos dados experimentais. A distribuição de pressão foi coletada à altura de 1,26 m que corresponde à altura do sensor PD no riser. A distribuição da pressão está apresentada no diâmetro normalizado para se observar a simetria do fluxo. A variação de pressão na terceira casa decimal, não se pode distinguir estatisticamente, mas, esses valores são reproduzíveis para cada vazão volumétrica apresentada. O modelo de ajuste da distribuição radial, as curvas, é estatisticamente significativo. Os gráficos na Figura 33, com intervalos de valores de pressão muito próximos, é válido para caracterizar o perfil radial sem sólidos em circulação. A variação

de pressão ocorre na terceira casa decimal, o programa gera pelo menos 7 casas decimais, como exemplo temos a vazão de 650 L/min que tem a pressão de 337,4967177 Pa, foi arredondada para 337,497 como está na Figura 33. Podemos observar que os valores estão ordenados, não ocorreu as oscilações entre os intervalos de pressão, eles estão claramente distintos pelas 3 casas decimais. Nos experimentos realizados os valores do perfil radial de pressão são reproduzíveis.

O perfil radial de pressão é descrito por Min Wang et al. 2019, em simulação de sistema gás-sólido em unidade piloto com full-loop, não apresenta a simetria da pressão em seção transversal do riser. A distribuição radial do perfil da pressão, cuja simetria podemos ver na Figura 33, é fundamental para comparar com medidas realizadas na unidade experimental. No caso a avaliação do perfil radial na altura do sensor PD tem o objetivo de possibilitar a comparação com o perfil radial medido com transmissão gama na UPF, uma vez que existe correlação entre as variáveis estudadas. A Figura 34 mostra a comparação dos perfis obtidos com tomografia gama e simulação com o MCNPX, cuja seção transversal do riser está à altura do sensor PD.

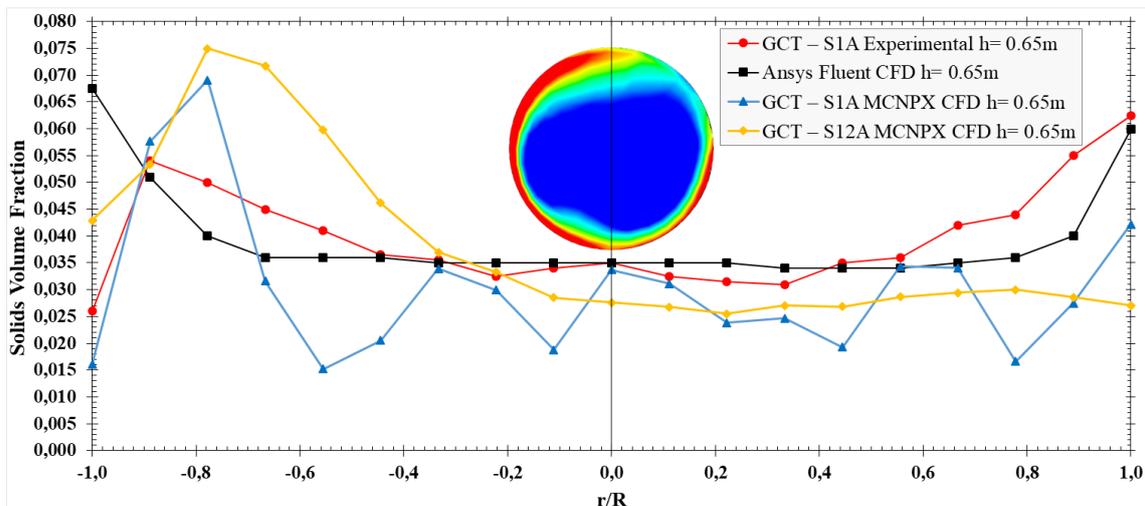
Figura 34 – Comparação entre dados experimentais e simulados com o MCNPX e tomografia gama no riser



Fonte: Ferreira da Silva 2019.

O efeito da parede do riser cilíndrico fica claramente visível na Figura 34. Com os dados da intensidade gama se calcula concentração e fração volumétrica do sólido. O mesmo autor Victor H. F. Ferreira da Silva (Silva et al. 2019.) estudou a distribuição radial da concentração de sólidos e da fração volumétrica de sólidos, em diversas alturas do riser da UPF.

Figura 35 – Comparação de informações da tomografia MCNPX com dados do Ansys Fluent e experimentais do perfil radial da fração volumétrica de sólidos para altura de 0.650 m

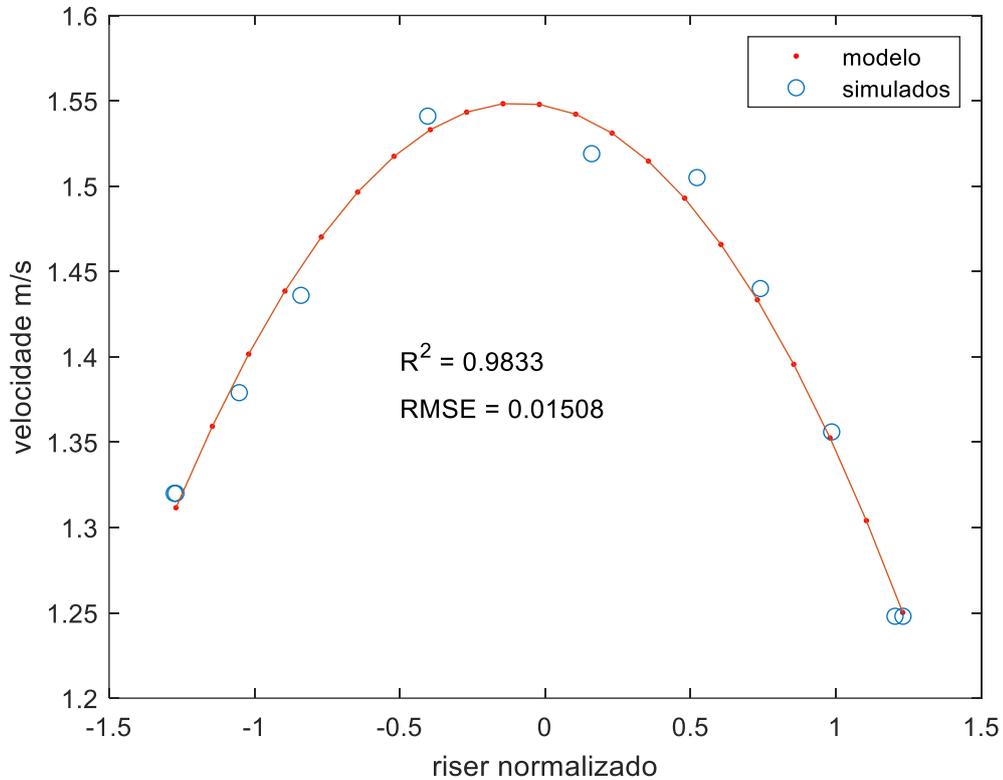


Fonte: Ferreira da Silva 2019.

Na figura 35, o estudo da distribuição de sólidos na altura de 0.650 m, está na mesma região do sensor PB na altura de 0.79 m, conforme a amostragem de referência utilizada no presente trabalho. A imagem gerada em CFD no centro, é típica de região de transição da região de turbulência para a região de aceleração, captando os dados da distribuição radial apresentada por pontos e linhas. Comparando com a Figura 5, que apresenta a velocidade axial, podemos observar que a altura de 0.650 m está na transição da região de turbulência para a região de aceleração.

5.4.2 Velocidade de sólido

Figura 36 - Distribuição radial da velocidade do sólido com vazão de 650 L/min.

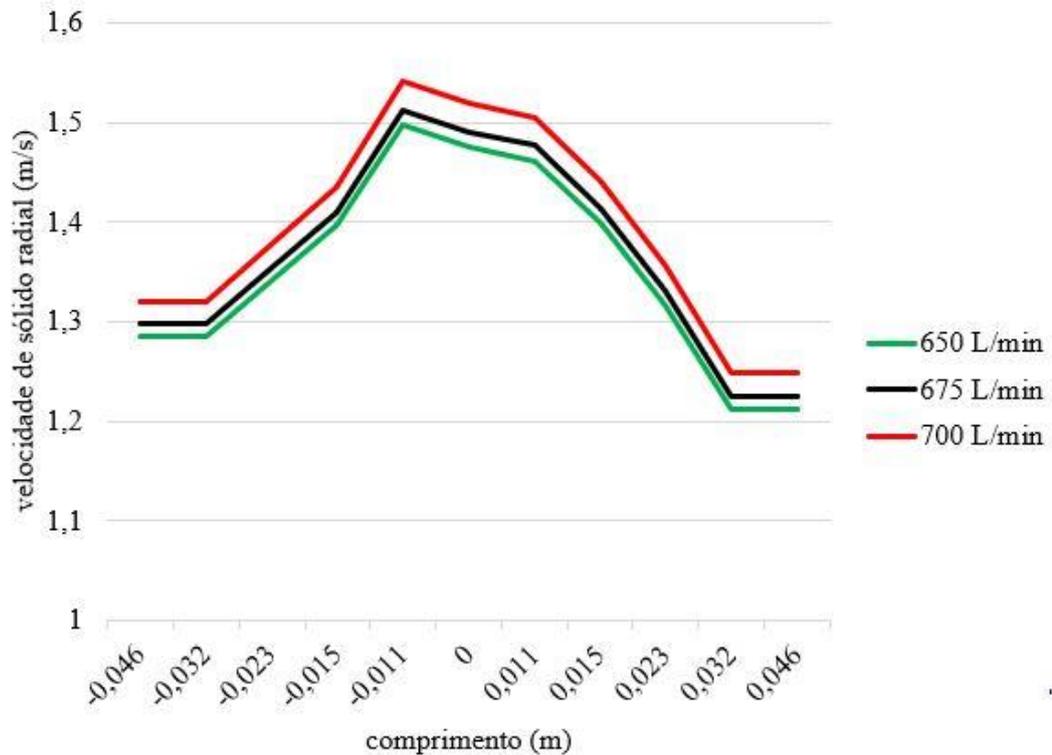


Fonte: autoria própria 2020.

Na Figura 36, a velocidade da fase sólida com vazão de ar de 700 L/min, é distribuída radialmente na altura do riser que corresponde ao sensor PD, possibilitando a comparação com medidas de transmissão gama. Os dados simulados, os círculos e a curva gerada com o modelo de ajuste parabólico. O modelo de ajuste aos dados simulados foi obtido com função do Matlab, tem 98,33% da variância dos dados explicados, o erro definido pelo RMSE, e a estatística dada pelo goodness-of-fit, apresenta os três coeficientes significativos, e o teste F é altamente significativo.

Seguindo o planejamento dos experimentos, para captar a distribuição radial da velocidade axial do sólido na UPFV, a vazão mássica permaneceu fixa e a vazão volumétrica variou de 650 L/min, 675 L/min e 700 L/min. Na Figura 37, podemos observar a velocidade do sólido em função da vazão volumétrica, para as três vazões.

Figura 37 - Distribuição radial da Velocidade do sólido em função da vazão de ar

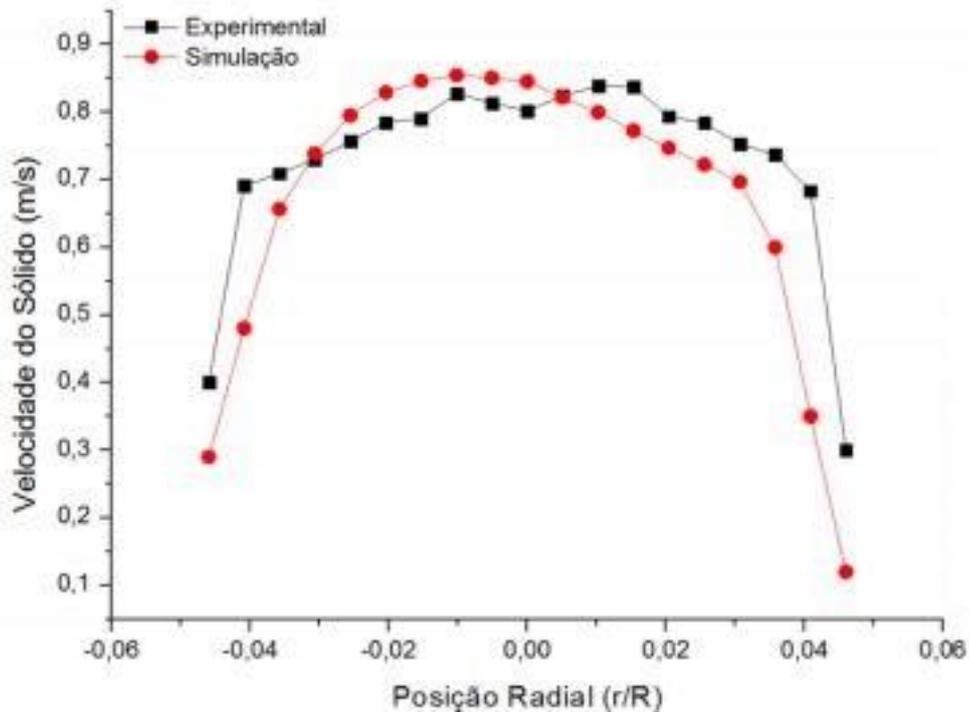


Fonte: autoria própria 2020.

Na Figura 37, observamos a distribuição radial da velocidade do sólido em função três vazões de entrada, no riser normalizado. Aqui a velocidade do sólido fica bem definida em função da vazão de ar, podemos visualizar que é simetricamente distribuída em torno do centro do riser, os valores em m/s estão proporcionais aos valores das vazões de ar em L/min.

No fluxo ascendente no riser todos os perfis são axiais, captar sua distribuição radial é requerido para definir a estrutura do fluxo e estudar problemas de recirculação devido a concentração de sólidos. Pela metodologia, o perfil axial combinado ao perfil radial do riser define a caracterização do escoamento bifásico, onde a primeira característica é a simetria para o tipo FCC. Esse modelo tem uma só entrada de sólidos lateral, quando a simetria fica bem definida é uma indicação da região de aceleração, na altura acima da zona de turbulência. A Figura seguinte apresenta a distribuição radial da velocidade da fase sólida simulada em CFD no riser da UPF.

Figura 38 - Perfil radial da velocidade de sólidos em simulação CFD Ansys

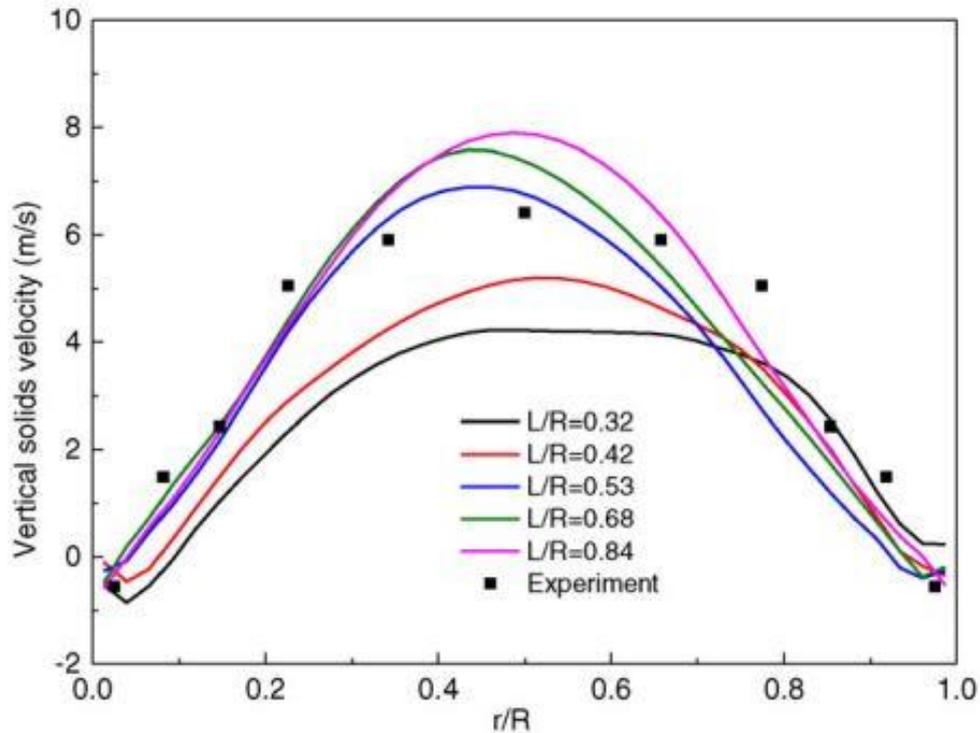


Fonte: Lima 2014.

Na Figura 38, os valores da velocidade estão num intervalo abaixo, mas, apresenta mais pontos para descrever a curva do que o gráfico da Figura 37. A distribuição vista na Figura 38, apresenta simulação no full-loop com suficiente pontos de amostragem e em função da vazão de três entradas de ar. Lima (2014) trabalhou na UPF, comparou a velocidade simulada em CFD, na chamada simulação no riser só, e comparou com dados experimentais. LIMA (2014) investigou a simetria dos perfis radiais na unidade piloto, conforme estudo da distribuição de velocidade apresentado na Figura 5, foi solicitada para caracterizar a estrutura núcleo-anelar do fluxo que estava questionada devido a discordância de medidas experimentais. A estrutura foi proposta por Davidson 2000, sua configuração foi quantificada em experimentos da UPF, utilizando a equação da Tabela 1, por Dantas et. al. O modelo núcleo-anelar é adequado para explicar dados experimentais em transporte no regime diluído.

A limitação de interpretar o fluxo multifásico no reator industrial leva a estudos de configurações mais complexas, como o trabalho de Li Peng et. al. 2016.

Figura 39 - Perfil radial da velocidade de sólidos no modelo núcleo-anelar



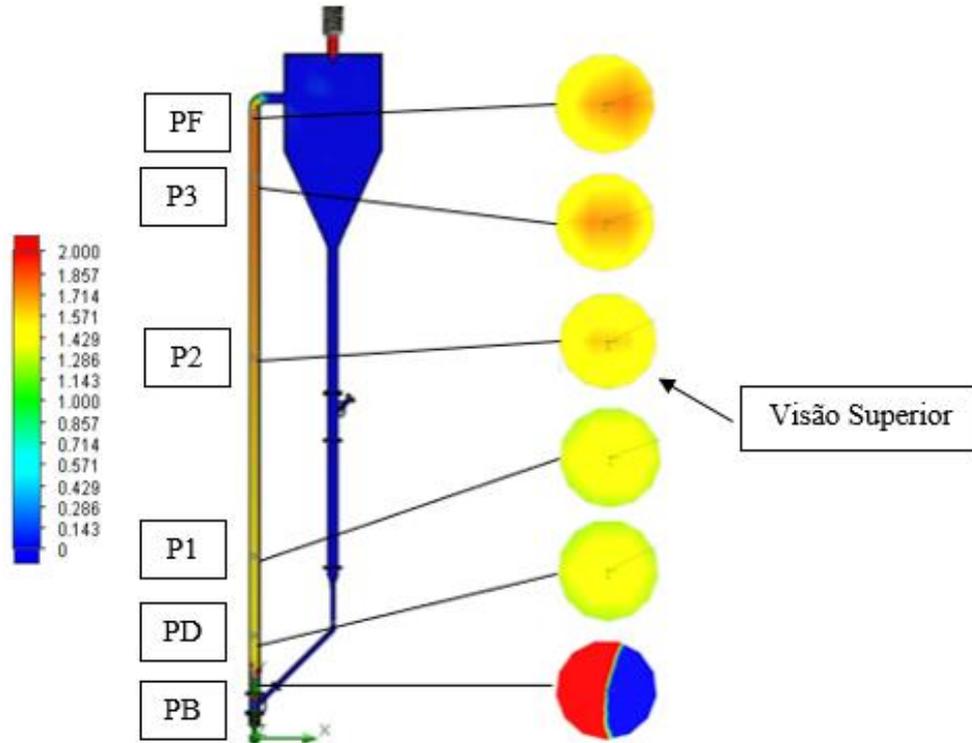
Fonte: Li Peng 2016.

As simulações dos gráficos nessa Figura 39, representam a secção transversal na altura de 1,02 m, e o riser tem diâmetro de 0,076 m comparando com 0,092 m o diâmetro na UPF. Nessa Figura 39 o centro está em 0,5 no riser normalizado. Li Peng, Figura 3, define a estrutura núcleo-anelar pela relação L/R , sendo L um segmento do raio a partir do centro e R o raio do riser. A figura 39 mostra que as velocidades crescem da curva preta para a curva cor de rosa, máximo 8 m/s e a região do núcleo também cresce. Ou seja, a porção da curva com valores mais altos na região do núcleo aumenta com a velocidade do sólido. Perfis radiais são estudados, associados com distribuição de probabilidades, cujos picos são mais altos quando o desvio padrão for menor, na curva gaussiana. O trabalho de Li Peng é de interesse porque trabalhos de referência na literatura consideram a estrutura núcleo-anelar limitada ao estudo da concentração de sólidos.

5.5 Comparação cruzada dos perfis axial e radial

5.5.1 Velocidade de sólido

Figura 40 - Velocidade de sólido nas secções transversais do riser com vazão de 650 L/min



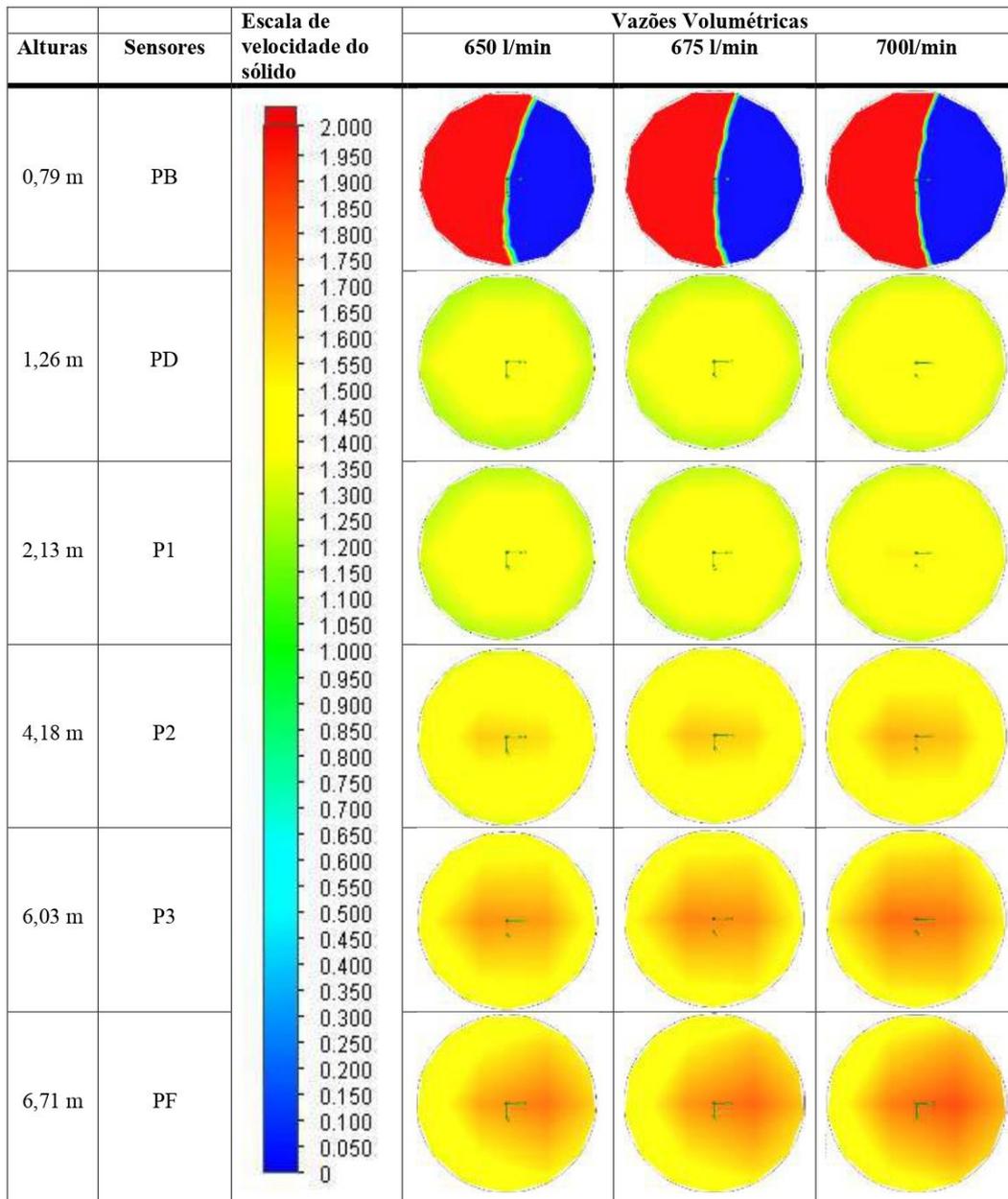
Fonte: autoria própria 2019.

a direita a coluna de retorno azul

A figura 40, apresenta o riser com os sensores de pressão e a direita a coluna de retorno azul, mais à direita a secção transversal com a distribuição radial do sólido no riser, a esquerda o intervalo de cores com valores da velocidade em m/s. Entre os sensores PB e PD, as cores fortes vermelho e azul indicam a região de turbulência, logo acima da câmara de fluidização. A secção transversal na altura do PD, a distribuição radial do sólido, amarelo, indica a região de aceleração que vai até o PF antes do joelho na entrada no vaso de separação. Na região de aceleração a velocidade do sólido cresce de cerca 0,950 m/s até 1,764 m/s, valores para a vazão de ar 650 L/min. Observamos que a distribuição radial é simétrica confirmando os resultados apresentados nas Figuras 33 e 36. Na secção transversal na altura do PF, vemos um afastamento da simetria, com a distribuição da velocidade mais alta deslocada para a direita, devido ao efeito do final do tubo. Esse efeito se verifica nos perfis da velocidade do sólido com as vazões de 675 L/min e de 700 L/min, e é mais acentuado para as velocidades mais altas em função da vazão de ar.

Para visualizar, a distribuição de velocidade do sólido ao longo do riser e comparar com a distribuição radial em cada altura, em função da vazão de ar, todas essas informações estão sintetizadas na Figura 41.

Figura 41 - Velocidade do sólido no riser em função da altura e da vazão de ar



Fonte: autoria própria 2019.

A Figura 41, apresenta em colunas da esquerda para a direita as alturas, os sensores de pressão, o intervalo de cores que expressa a velocidade em m/s, e a distribuição radial na ordem crescente da vazão de ar. Identificamos a caracterização das distribuições axial e radial da

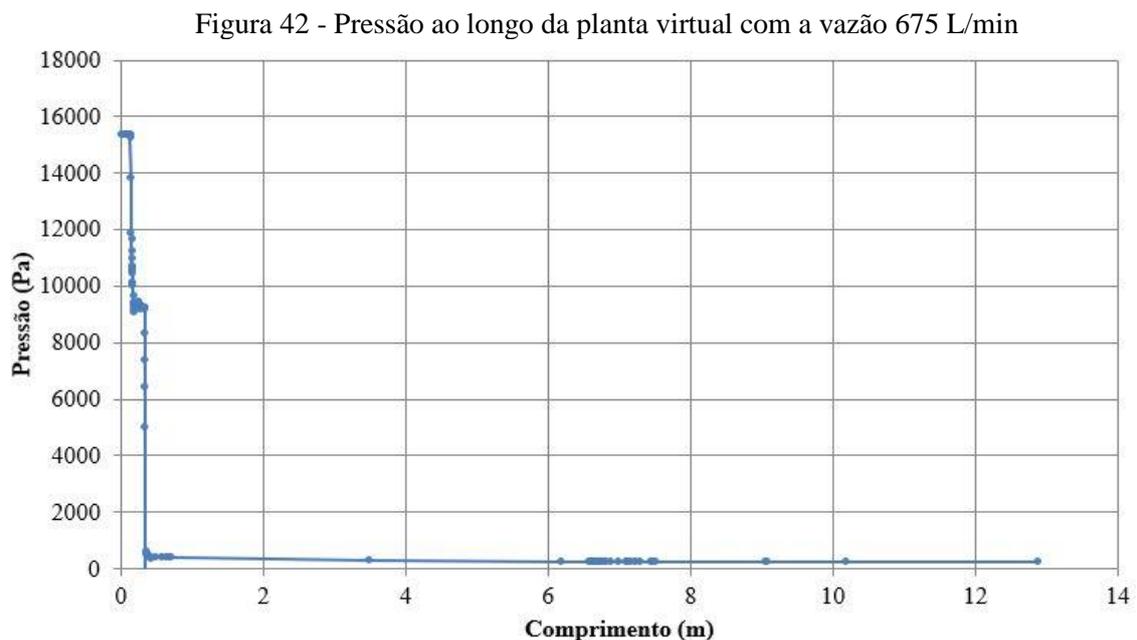
velocidade do sólido apresentada na Figura 45, para a vazão de 650 L/min, que aparece aqui na quarta coluna.

Vemos bastante informação relevante sobre a velocidade do sólido que cresce ao longo do riser, para uma determinada concentração, que fica mais diluída com o aumento da entrada de ar no riser, dados apresentados na Figura 46. Informações sobre os perfis axial e radial que permitem visualizar as regiões do riser, na Figura 41, certamente, contribui com para entender melhor o escoamento bifásico (Dudukovic, 2003). Problemas intrínsecos a geometria tipo FCC, como a região de turbulência na entrada do riser e o joelho com ângulo de 90 graus na entrada da câmara de separação, (Bastos et al 2008). Observando a última linha das três colunas que mostram a distribuição radial, na Figura 41, observamos que o efeito do final de tubo, cresce com a velocidade do sólido. Essa observação, contudo, requer estudo mais detalhado e quantificação mais precisa.

5.6 – Simulação da unidade o estado do full-loop

O estudo da distribuição de pressão.

A unidade UPFV é uma planta virtual, dual da planta experimental a UPF, e todo nosso trabalho está apresentado em simulação do full-loop. Assim a apresentação do estudo no riser, são resultados da simulação realizada em toda a planta piloto. Seguimos a sequência do estudo com três vazões de entradas de ar, na Figura 42.

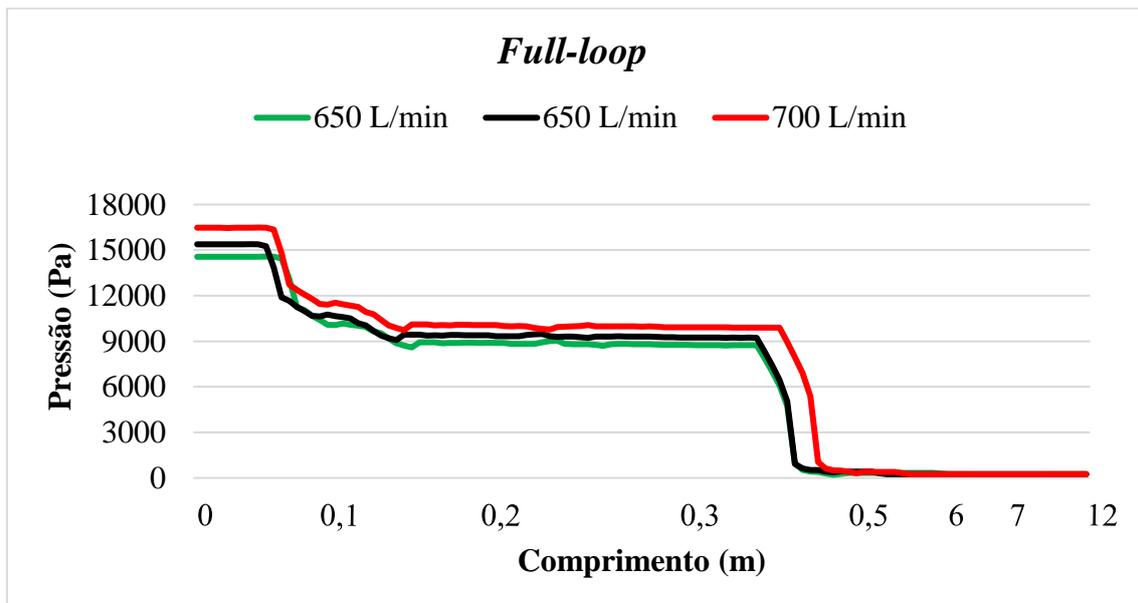


Fonte: autoria própria 2022.

Na Figura 42, a pressão medida em Pa se distribui ao longo do comprimento da planta piloto em metros. No início tem esse valor extremamente alto, abaixo da base do riser no sensor de controle o PA. Os valores da pressão nos sensores estão listados na tabela 4. Observamos que do zero até 6 metros corresponde ao riser, e depois do vaso de separação até o final da coluna de retorno. A informação é relevante considerando que se pode detalhar em qualquer setor da unidade, na avaliação do desempenho da UPFV, no estudo de aperfeiçoamento da geometria e para estudo de projeto de unidade tipo FCC.

A investigação dos perfis ao longo da planta piloto avaliou também a vazão de entrada ar com 650 L/min e 700 L/min, os resultados são consistentes com estes da Figura 42, e estão sumarizados na Figura 43.

Figura 43 - Pressão ao longo da planta virtual com três vazões de entrada de ar



Fonte: autoria própria 2022.

Na Figura 43, observamos um detalhamento das pressões na região de 0 até 0,3 m, abaixo da base do riser, a região de transição vai até 0,5 m e então entra no riser, cuja pressão se distribui até 6 metros, e em seguida até o final apresenta a coluna de retorno. Essa planta virtual com componentes projetados em geometria 3D, com o módulo de simulação em CFD do Solidworks, possibilita obter resultados comparáveis a mais recente literatura.

A literatura foca nos avanços contínuos em hardware computacional, bem como em modelos numéricos, e as simulações tridimensionais do loop CFB completo, são mais adequadas para investigar o sistema multifásico (Sundaresan 2011).

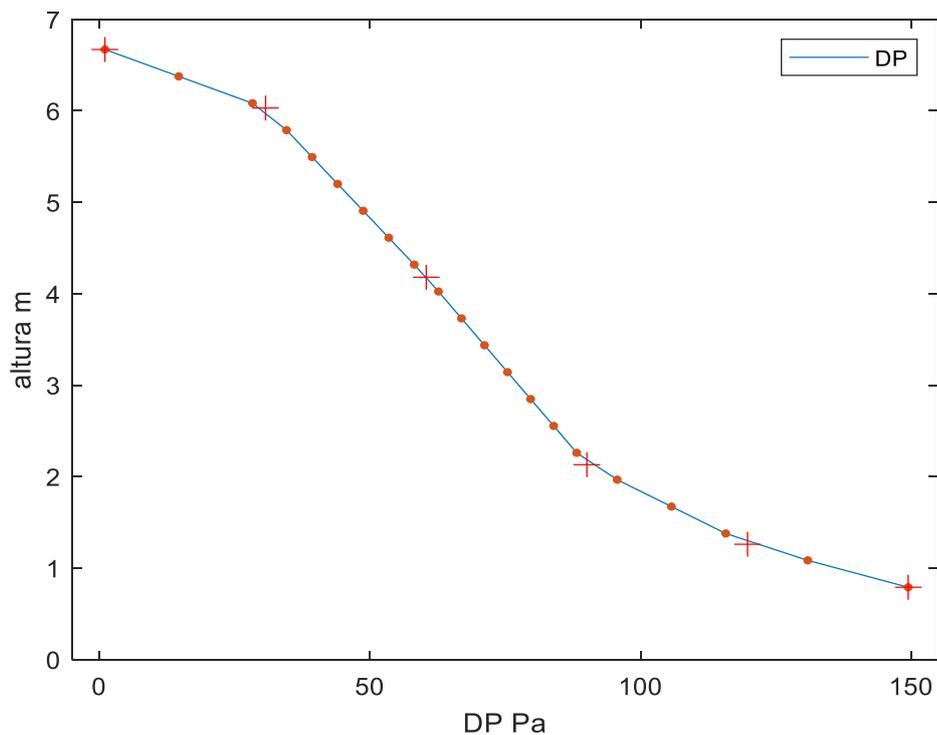
Chu et al. 2007 apresentou um estudo numérico do fluxo gás-sólido em um leito fluidizado circulante tridimensional de ciclo completo incorporando códigos do método de partículas discretas (DPM) ao pacote de software comercial CFD Fluent.

Os resultados da diferença de pressão, ΔP , no riser, apresentado na Figura 32, se complementa com o estudo da distribuição visualizada na Figura 43, que define os intervalos onde se pode investigar a distribuição do ΔP , no full-loop. A distribuição do ΔP ao longo da unidade piloto é resultado importante na compreensão do sistema CBF leito fluidizado circulante segundo Min Wang, 2019.

5.7 – Caracterização dos perfis da UPFV

Trabalhos de revisão da literatura colocam em evidência perfis que são observados em diversos trabalhos, que caracterizam o riser tipo FCC, independentemente das dimensões. Trabalho mais recente Min Wang 2019, apresenta o gráfico da distribuição de ΔP ao longo da altura, no riser piloto com altura de 18 m, diâmetro 0,8 m, cujo perfil experimental tende a forma de (S). Essa distribuição da diferença de pressão é consistente com a literatura da simulação do riser. Na Figura 44, podemos observar a distribuição do ΔP com os dados simulados na UPFV.

Figura 44 - Queda de pressão ΔP ao longo do riser



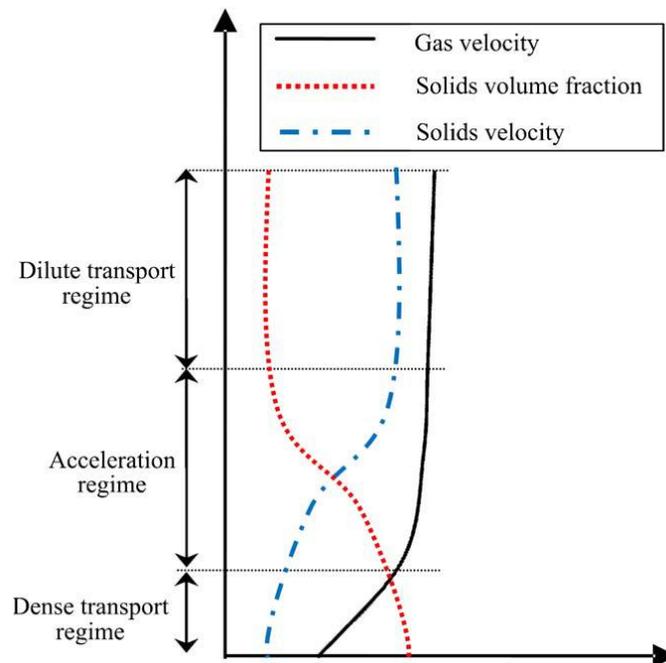
Fonte: autoria própria 2022.

Na Figura 44, o ΔP está apresentado em linha e pontos por valores interpolados e a cruz mostra os valores simulados. A tendência do perfil é semelhante a forma de (S), de acordo com a distribuição citada no trabalho de Min Wang. Os valores do ΔP foram calculados com os dados da Tabela 4, o ΔP total do riser com a vazão de 700 L/min.

Com os valores do ΔP pela equação de Luckos, 2005, dada na Tabela 1, calculamos a concentração de sólidos kg/m^3 e em seguida calculamos a fração volumétrica de sólidos, que expressa a concentração em função do volume $\varepsilon_s = 1 - \varepsilon$. Sendo adimensional é um índice de similaridade funcional num processo de scale-up, levar resultados da piloto para a escala industrial. Completamos a caracterização básica com a velocidade da fase gasosa, o ar, cuja fração volumétrica ε , é requerida na expressão da velocidade do gás $u_g = U/\varepsilon$, com U a velocidade que corresponde a entrada de ar L/min. A velocidade do ar não apresentou uma distribuição coerente com a caracterização dos perfis, provavelmente devido ao transporte de sólidos em regime diluído, a ε_s representa cerca de 1 % de sólidos, enquanto na literatura citada é de cerca de 10 %. Os perfis podem ser comparados em (ZHU, C.; DAWEI, 2010).

Na Figura 45, a fração volumétrica e as velocidades de sólido e gás, estão apresentadas esquematicamente como referência para a caracterização dos perfis

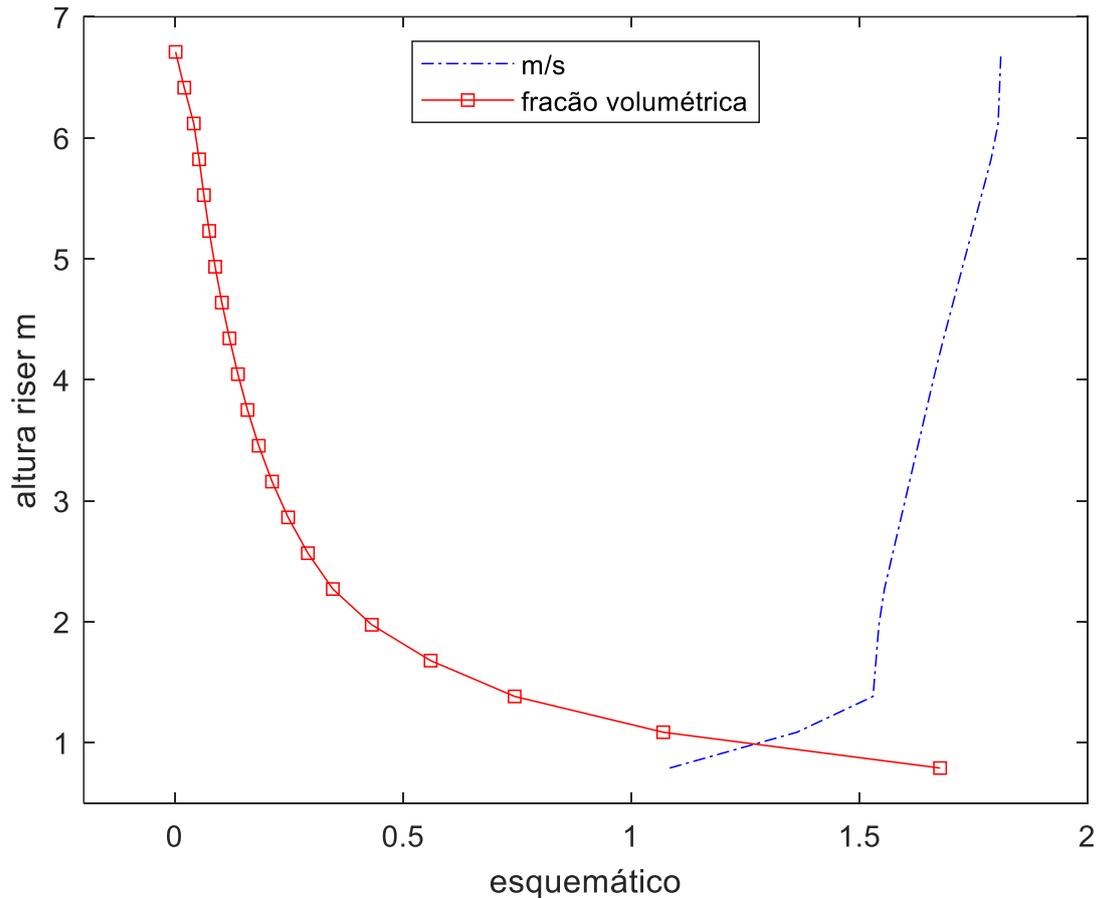
Figura 45 - Os perfis da fração volumétrica e velocidades de sólido e gás



Fonte: Chao Zhu, 2010.

Na Figura 45, *Schematic solids holdup distribution along a riser*, Chao Zhu, 2010, os autores apresentam os perfis característicos, com os regimes de transporte de sólido ao longo do riser. Para comparar com o comportamento dos perfis de estudos podemos observar a Figura 46.

Figura 46 - Perfis da fração volumétrica e da velocidade de sólidos



Fonte: autoria própria 2020.

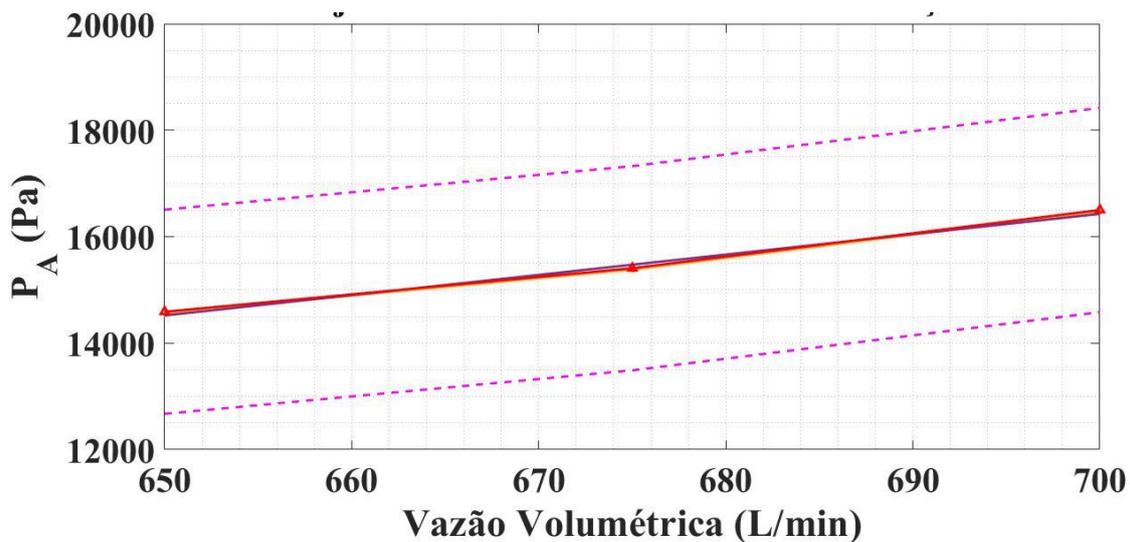
Na Figura 46, a ε_s está representada por linha e quadrado e a velocidade de sólidos em linha pontilhada, representam os dois perfis ao longo do riser e o eixo x (em m/s), esquemático porque a fração volumétrica está multiplicada por 100 para ficar no mesmo gráfico. Comparando com a Figura 50, observamos que os perfis estão representados por curvas características do riser tipo FCC. Note que os perfis na Figura 46, apresentam valores de ε_s e de m/s simulados na UPFV enquanto que a Figura 45 é esquemática.

5.8 – Avaliação estatística e critério de validação

Utilizando o Matlab foram avaliados os dados dos perfis estudados na UPFV, e a comparação com dados experimentais da UPF e dados calculados por meio de estatística básica. Os dados de um perfil em comparação com outro perfil, foi estudado por meio do ajuste, com modelos utilizando o método dos mínimos quadrados, visando a validação dos perfis. Segundo a amostragem de referência cada medida inclui o valor do sensor PA, se não está reprodutível, não se inicia o experimento. Como dado de controle foi avaliado o intervalo de confiança para os dados do PA. Os dados analisados são bem consistentes e poderia ser indicação de utilizar um fator de correção para conjunto de dados ainda não avaliados.

A Figura 47, mostra a avaliação dos dados da pressão no sensor PA como teste de controle de reprodutibilidade.

Figura 47 - Intervalo de confiança para os dados de controle

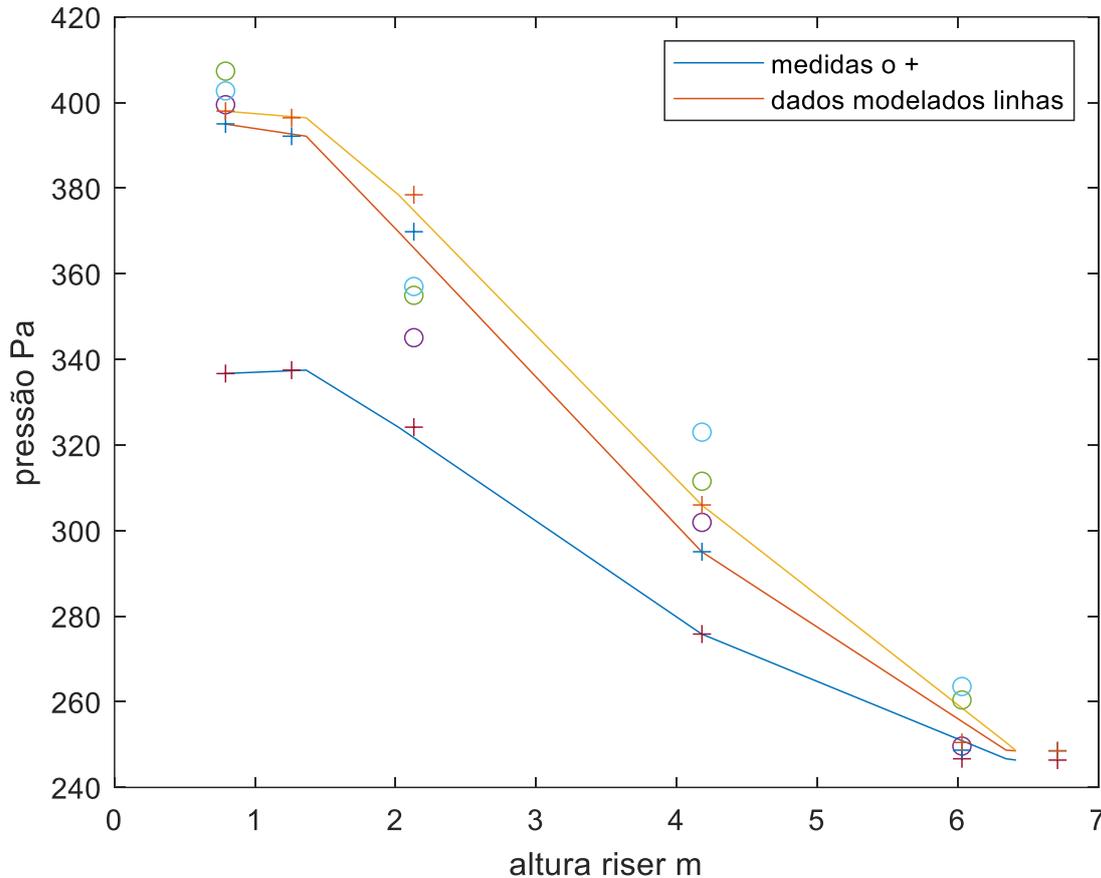


Fonte: autoria própria 2020.

Na Figura 47, os dados medidos estão nos pontos e a linha representa dados ajustados, as linhas pontilhadas representam os limites no intervalo de confiança com 95% de predição.

Para comparar os perfis de pressão simulados e experimentais, os dados das Tabelas 4 e 5 foram colocados no mesmo gráfico com uma regressão múltipla ajustando os dados simulados, a Figura 48 apresenta os gráficos.

Figura 48 - Perfis de pressão simulado e experimental comparados com regressão



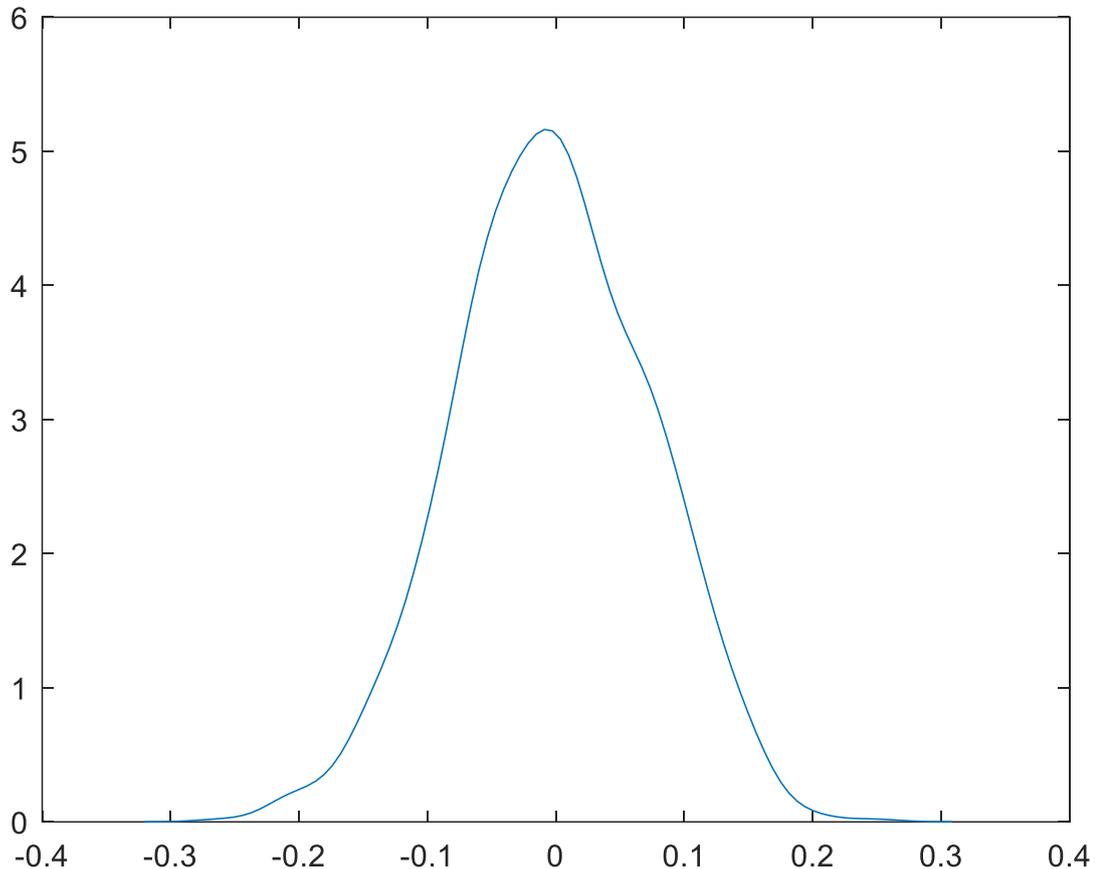
Fonte: autoria própria 2020.

Na Figura 48, os perfis de pressão estão representados ao longo do riser por pontos simulados em cruz e círculo experimentais, a linha apresenta valores obtidos com regressão múltipla linear da simulação. A pressão em Pa é função da vazão de entrada de ar com os valores de 650 L/min, 675 L/min e 700 L/min, estão todos os pontos das Tabelas 4 e 5. A regressão é significativa estatisticamente no ajuste aos dados simulados, a comparação com o perfil experimental mostra 10 % de variância não explicada, esse é o critério de validação proposto para o conjunto dos dados, aceito até 10 % da variância não explicada. Os dados dos perfis da velocidade de sólidos apresentados na Figura 31, analisados por esse critério, mostram que a variância não explicada é de cerca de 17 %, isto é, não estão validados.

Devemos considerar que o critério de validação definido por normas de incerteza, requer a validação dos coeficientes da regressão. Uma simulação com o método de Monte Carlo gerando um número de amostras suficiente para serem testados como variáveis aleatórias, obteria a variância mínima pelo teorema de Gauss-Markov. Um teste com 1000 amostras

simulando os coeficientes do modelo da regressão, foi realizado com funções do Matlab aplicando o bootstrap, e está apresentado na Figura 49.

Figura 49 - Distribuição dos resíduos da regressão obtidos com o bootstrap



Fonte: autoria própria 2020.

Na Figura 49, vemos a distribuição em torno da média dos resíduos com 1000 amostras processadas com função do bootstrap no Matlab. Com a regressão apresentada na Figura 48, foram avaliados os valores dos resíduos $rs = y - y_{fit}$; em seguida o gráfico foi gerado com a função `ksdensity` que processa a distribuição em torno da média. Com o gráfico da Figura 49 podemos afirmar que a análise dos resíduos valida a regressão. Contudo, devemos considerar que os coeficientes da regressão não foram validados pelo método bootstrap, não foi obtido uma distribuição como essa da Figura 49.

Na literatura não encontramos discussão dos resultados envolvendo um critério de validação para perfis de parâmetros do escoamento bifásico. Na validação de modelos de simulação comparando com dados experimentais “sempre se chega uma razoável ou boa concordância sem um critério quantitativo de validação” (Buenos, et al, 2012).

6 CONCLUSÕES

Os Objetivos foram atingidos considerando os seguintes resultados:

A planta virtual UPFV foi construída obedecendo à similaridade da planta piloto tipo FCC a UFP. A similaridade funcional foi investigada com o objetivo de estabelecer o sistema dual modelo físico – planta virtual. O perfil de pressão ao longo do riser comparado com as equações empíricas da literatura e com dados experimentais, mostrou concordância, indicando que a similaridade funcional foi obtida.

O estudo no sistema dual complementa a UPF, com ampla possibilidade de distribuição dos pontos de coleta de dados, no modelo físico o número de sensores de pressão é limitado devido a perturbação no fluxo. A comparação com dados simulados num sistema referenciado pelo modelo experimental, proporcionou mais adequada investigação dos perfis de distribuição axial de sólidos.

Na sequência do estudo no sistema dual, a simulação CFD do riser obteve o perfil radial da distribuição da velocidade de sólidos, resultado que permitiu caracterização da taxa de circulação do fluxo bifásico. Os experimentos estão disponíveis no banco de dados da UPFV para posterior comparação com os estudos de transmissão gama experimental e com simulações no método Monte Carlo estudadas em seções transversais do riser da UPF.

Os recursos computacionais implementados no estudo dual UPF- UPFV permitiu avaliar a variação do fluxo no topo e base do riser, os pontos críticos da geometria do FCC. O software gera gráficos quantificando o tempo de estabilização das condições de operação, sinalizando o estado estacionário a condição requerida pelos modelos fluidodinâmicos.

Em adição aos Objetivos foi estudado:

Técnicas estatísticas para avaliar parâmetros do escoamento bifásico, distribuição da concentração das fases ar e catalisador, fração volumétrica de sólidos e distribuição das velocidades das duas fases foram testadas. Critérios para validação de perfis fluidodinâmicos foram propostos e parcialmente atingidos.

Devemos considerar que o trabalho se limitou ao estudo do transporte de sólidos em regime diluído em condições de operação em plantas tipo FCC com a teoria disponível na literatura.

6.1 Sugestão para trabalhos futuros

Aperfeiçoar critérios de validação dos perfis no escoamento do fluxo bifásico.

Trabalhar com recurso de computação que viabilizem plena simulação do full-loop em 3D, o tempo de computação foi fator limitante no presente trabalho.

Definir a condição quantitativa para trabalhar no estado estacionário no sistema dual modelo físico-modelo virtual em full-loop, validado por modelo de controle.

Obter parâmetros fluidodinâmicos com critérios universais para o fluxo bifásico do leito fluidizado circulante.

Propor modelo matemático para descrever a recirculação de sólidos com a finalidade de minimizar o problema do reator industrial.

REFÊNCIAS

- BASTOS J.C.S.C.; ROSA M.; MORI F.; MARINI; MARTIGNONI, W.P., Modelling and simulation of a gas–solids dispersion flow in a high-flux circulating fluidized bed (HFCFB) riser, **Catalysis Today**, Volume 130, Issues 2–4, 30 January 2008, Pages 462–470
- BERTONY, V. E., BARBOSA, E. S., DANTAS, C. C. CRUZ FILHO A.J, MOURA A.E., SÍLVIO B. M., EMERSON A. O. L. **A cad pilot unit design and simulation of circulating two phase flow for parameters determination by gamma transmission measurements.** In: 8th World Congress On Industrial Process Tomography, Iguassu Falls, Paraná, Brazil. The International Society for Industrial Process Tomography, 2016.
- BOCK, E. et al., “**Implantable Centrifugal Blood Pump With Dual Impeller and Double Pivot Bearing System: Electromechanical Actuator, Prototyping, and Anatomical Studies**”. **Artificial Organs**, vol. 35, n. 5, 437 a 442. 2011b.
- BRITO, M. F. P; NETTO, W. F. S.; MIRANDA, M. V. F. E. S.; JUNIOR, I. A. S.; DANTAS, C. C.; SANTOS, V. A.; MELO, S. B.; LIMA E. A. O. **Monitoring catalyst flow rate in a fcc cold pilot unity by gamma ray transmission measurements.** International Nuclear Atlantic Conference, 24-29, 2013.
- BUENOS A. A.; SANTOS JUNIOR A. A.; RODOVALHO T. G. A new method to calibrate pressure gauges for pneumatic applications. **ABCM Symposium Series in Mechatronics**, Vol. 5, Section VIII – 2012, ABCM, Sensors & Actuators
- CAVALHEIRO, A. et al., “Safety Control applied to a Ventricular Assist Device”. **The International Journal of Artificial Organs**, v. 35, n.1, 587 a 591, 2011.
- CHAO ZHU; DAWEI WANG, Resistant effect of non-equilibrium inter-particle collisions on dense solids transport, *Particuology*, B (2010) 544-548
- CHU K.W., B. WANG, AND A. YU, **Discrete particle simulation of the gas-solid flow in a circulating fluidized bed**, Proceeding of the 12th International Conference on Fluidization, Eds, F. Berruti, X. Bi, and T. Pugsley, Engineering Conferences International, 2007, p. 735-742.
- CLAUDINO L. S, BERTONY E. V, DANTAS C. C, BARBOSA E. SANTOS AND OLIVEIRA M. F. M. **Two-Phase Flow in 3D CAD Pilot Unit Simulation and Gamma Ray Tomography Validation.** 9th World Congress on INDUSTRIAL PROCESS TOMOGRAPHY, World Heritage City of Bath2 - 6 September 2018.
- CRUZ, A J, DANTAS C. C, et al, **IPT in Industry – Digital Control Design for a Circulating Fluidized Bed Unit Using Gamma Transmission Measurements**, *ISIPT 8th World Congress in Industrial Process Tomography, Igaussu Falls, Brazil*, 2016
- DANTAS, C. C.; SANTOS, V. A.; MELO, A. C. B. A., GRIEKEN, R. V. Precise gamma ray measurement of the radial distribution of a cracking catalyst at diluted concentrations in a glass riser. **Nuclear Instruments and Methods in Physical Research**, v. 251, p. 201-208, 2006.
- DAVIDSON, J. F. Circulating fluidized bed hydrodynamics. **Powder Technology**, v. 113, p. 249-260, 2000.

DEROUIN, C.; NEVICATO, D.; FORISSIER, M.; WILD, G.; BERNARD, J. R. **Hydrodynamics of riser units and their impact on FCC operation**, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 36, p. 4504-4515, 1997.

DUDUKOVIC, M. P. **Use of gamma ray computed tomography (CT) and computer aided radioactive particle tracking (CARPT) in multiphase reactors**. *Industrial Engineering Chemical Research*, V. 57, n.6, p.249-261, 2003.

GAO, J.; LAN, X.; FAN, Y.; CHANG, J.; WANG, G.; LU, C.; XU, C. **Hydrodynamics of gas–solid fluidized bed of disparately sized binary particles**. *Chemical Engineering Journal*, v. 64, n. 20.p. 4302–4316, 2009.

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

GIDASPOW, D. *Continuum Kinetic Theory Description* 1994, 95, 1-29,
DOI:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-051226-6.50026-1>

KNOWLTON, T. M. **Tools and techniques for diagnosing and solving operating problems in fluidized bed systems**. *Oil & gas Science Technology - Rev. IFP*, v.55, n. 2, p. 209 - 217, 2000.

LI PENG.; YINGYA W.; CHENGXIU W.; JINSEN G.; XINGYING L. **2.5D CFD simulations of gas–solids flow in cylindrical CFB risers**. *Powder Technology* **291**, 229–243 (2016)

LIMA FILHO, H. J. B.; BRITO, M. F. P.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V. A.; DANTAS, C. C.; **Validação experimental de simulações cfd de um leito fluidizado circulante gás-sólido tipo riser**. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2014.

LUCIANO FUENTES LEO; MAURICIO I.; BOCK E. G. P. Análise por CFD do Escoamento de Bombas de Sangue Centrífugas em Plataforma Integrada Cad/Cae, 4º Congresso Científico da Semana Nacional de Ciência e Tecnologia no IFSP 2013

LUCKOS, A.; HOED, P. **A study into the hydrodynamic behavior of heavy minerals in circulating fluidized bed**, *Industrial Fluidization South Africa*, v. 1, p. 345-355, 2005.

M.A. HABL, A. FROHNER, G. TONDL, C. PFEIFER. **Fluid dynamics study on a dual fluidized bed cold-flow model**. *Powder Technol.*, 316 (2017), pp. 469-475.

MATSEN, J. M. **Scale-up of fluidized bed processes: Principle and practice**, *Powder Technology*, vol. 88, p. 237-244, 1996.

MOURA, A. E. **Controle da injeção de catalisador em uma unidade piloto tipo FCC a frio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, PE. 2015.

MIN WANG, YINGANG WU, XIAOPONG SHI, XINGYING LAN, CHENGXIU WANG, JINSEN GAO, Full-loop simulation of gas-solid flow in a pilot-scale circulation fluidized bed, *Chem. Eng. Technol.* 2019, 42, No. 4, 932-939

NAYAK, S. V.; JOSHI, S. L.; RANADE, V. V. **Modeling of vaporization and cracking of liquid oil injected in a gas–solid riser**. *Chemical Engineering Science*, v. 60, n. 22, p. 6049 – 6066, 2005.

- OKA, S. N. **Fluidized Bed Combustion**. 1. Ed. New York: Marcel Dekker Inc, 580 p, 2004.
- OLIVEIRA M. F. M. **modelagem do transporte de sólidos em regime denso em unidade piloto a frio por medição de transmissão gama**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear), Universidade Federal de Pernambuco. Recife, PE. 2018.
- RABINOVICH, E.; KALMAN, H. **Low regime diagram for vertical pneumatic conveying and fluidized bed systems**. Powder Technology Volume 207, Issues 1–3, 15 February 2011, Pages 119-133.
- SANTOS, K. A. L. **Validação Da Simulação Por CFD do Riser de uma Unidade Piloto a Frio de FCC Utilizando Transmissão Gama**. Dissertação de Mestrado – Departamento de Energia Nuclear – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2013.
- SANTOS, V. A.; DANTAS, C. C. **Transit time and RTD measurements by radioactive tracer to assess the riser flow pattern**. Powder Technology, v. 140, n. 1/2, p.116 - 121, 2004.
- SILVA V. H. F. F., DANTAS C. C., MELO S. B., LIMA, F. R. A., OLIVEIRA P. R. B., RESENDE FILHO T. A., LINS J. A. G., VIEIRA E. B., ANDRADE B. G., VIANA M. S.; Determination of fluid dynamic parameters through imports of CFD images validated in experiments for the MCNPX code., Brazilian Journal, of Radiation Science, 2021
- SUNDARESAN S. **Reflections on mathematical models and simulation of gas-particle flows**. Proceeding of the 10th International Conference on Circulating Fluidized Beds and Fluidization Technology, Eds, T. Knowlton, Engineering Conferences International, 2011, 21-40.
- THEOLOGOS, K. N.; MARKATOS, N.C. **Advance Modeling of Fluid Catalytic Cracking “riser” – Type Reactors**. AI Che Journal, v. 39, n. 6, p. 1007 – 1017, 1993.
- TINGWEN LI; SHADLE L. Comparison of Full-loop and riser-only simulation for a pilot-scale circulating fluidized bed, Chemical Engineering Science, V 120, 2014.
- XIAOCHENG L.; YAODONG W.; JIANFEI S. **A handy method for estimating the particle concentration distribution in FCC risers using a gamma-ray transmission technique**. China University of Petroleum (Beijing) and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 11:318-322, 2014.
- ZHU, C.; DAWEI, W. **Resistant effect of non-equilibrium inter-particle collisions on dense solid transport**. Particuology, vol. 8, p. 544-548, 2010.