

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR**

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE**

Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares

**CONTROLE DA INJEÇÃO DE CATALISADOR EM UMA UNIDADE
PILOTO TIPO FCC A FRIO**

Alex Elton de Moura

Orientador: Prof. Dr. Carlos Costa Dantas

Recife, PE
Agosto, 2015

ALEX ELTON DE MOURA

**CONTROLE DA INJEÇÃO DE CATALISADOR EM UMA UNIDADE
PILOTO TIPO FCC A FRIO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares para obtenção do título de Mestre em Ciências, Área de Concentração: Tomografia gama e fluidodinâmica do processo de refino de petróleo.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Costa Dantas

Recife, PE
Agosto, 2015

Catálogo na fonte
Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4 / 1502

M929c

Moura, Alex Elton de.

Controle da injeção de catalisador em uma unidade piloto tipo FCC a frio. / Alex Elton de Moura. - Recife: O Autor, 2015. 88 f. : il., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Costa Dantas.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2015.

Inclui referências bibliográficas.

1. Catalisador FCC. 2. Transmissão gama. 3. Válvula VPC. 4. Automação e controle. I. Dantas, Carlos Costa, orientador. II. Título.

CDD 621.48 (21. ed.)

UFPE
BDEN/2015-26

CONTROLE DA INJEÇÃO DE CATALISADOR EM UMA UNIDADE PILOTO TIPO FCC A FRIO

Alex Elton de Moura

APROVADA EM: 31.08.2015

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Costa Dantas

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Luiz Antonio Pereira dos Santos – CRCN-NE/CNEN

Prof. Dr. Tiago Leite Rolim – DEMEC/UFPE

Prof. Dr. Emerson Alexandre de Oliveira Lima (UPE)

Prof. Dr. Enivaldo Santos Barbosa – Dept. Eng. Mecânica/UFCE

Visto e permitida a impressão

Coordenador(a) do ~~PROTEN~~/DEN/UFPE

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela sabedoria e oportunidade de fazer este trabalho.

Agradeço ao meu orientador professor Carlos Costa Dantas por toda ajuda, incentivo e paciência. Exemplo de dedicação à ciência, aprendi bastante com ele.

Agradeço a todos os amigos do Departamento de Energia Nuclear da UFPE, Karlos Guedes, Alexandra Carolina, Márcio Paixão, Antônio Otávio, Hilário Jorge, Zacarias Barbosa e Marcelo Ferreira pela grande contribuição durante todo o mestrado.

Agradeço aos professores da banca examinadora, Tiago Rolim, Luiz Antônio, Emerson Alexandre e Enivaldo Barbosa que contribuíram com valiosas críticas.

Em especial agradeço ao professor Enivaldo Barbosa do Departamento de Engenharia Mecânica da UFCG que me ajudou bastante na realização deste trabalho.

Certamente não lembrei de todos mas quero deixar aqui o meu muito obrigado a todas as pessoas que me ajudaram, sem vocês esta dissertação não seria a mesma.

RESUMO

O Craqueamento Catalítico Fluidizado (FCC) é largamente utilizado no processo de refino do petróleo para transformar hidrocarbonetos de baixo valor comercial em produtos de elevado valor agregado, como gasolina, diesel e GLP. A crescente demanda de combustíveis fósseis, que são recursos não renováveis, requer melhor compreensão do processo e da operação, desafios que tem atraído o interesse da indústria e da academia pelo FCC. Esse processo é bastante competitivo e está em contínuo desenvolvimento tecnológico, cujas pesquisas estão divididas em duas grandes linhas: modelos fluidodinâmicos frios e modelos cinéticos. A combinação das informações obtidas nas linhas de pesquisas deve retornar ao processo industrial e garantir a competitividade. Com essa perspectiva, foi construída uma Unidade Piloto a Frio (UPF), no Departamento de Energia Nuclear da UFPE, para a investigação de parâmetros fluidodinâmicos no *riser* da unidade com auxílio das medidas de transmissão gama. A transmissão gama é requerida como método não intrusivo para medir a distribuição da concentração do catalisador no reator do FCC o *riser*. Com a operação da UPF realizam-se medidas em tempo real de pressão, vazão, intensidade da radiação, com a condição de que a automação garanta que as variáveis do sistema estão sob controle. Este controle é necessário para realização das medidas porque as hipóteses dos modelos matemáticos para simular o escoamento bifásico ar-catalisador de FCC, assumem que o sistema é um leito fluidizado circulando em regime estacionário. Numa unidade piloto como no processo industrial, o controle da injeção de catalisador é um processo de extrema importância, pois a eficiência da reação de craqueamento dos hidrocarbonetos depende da concentração e da distribuição do catalisador no *riser*. No presente trabalho foi desenvolvido um novo tipo de injetor de sólidos, com desempenho avaliado em função da pressão, intensidade gama e da estabilidade do sistema sob controle automatizado. Os resultados apresentados demonstram que as variáveis do processo, medidas em tempo real, apresentaram a precisão requerida para a operação do sistema em regime estacionário.

Palavras-chave: Automação e controle, válvula VPC, transmissão gama, catalisador FCC.

ABSTRACT

The Fluid Catalyst Cracking FCC is a worldwide used process in petroleum refinery aiming to break fossils long carbohydrates chains into more commercial interesting products as gasoline, diesel, GLP. Increasing demand for renewable energy due to time limiting of the fossils sources and also for environmental reasons requires a continuous development and innovation of the FCC process. Such a demand brings technologic and academic efforts in order to keep FCC as a competitive commercial process. Therefore, the research follows two big lines: fluid dynamics and kinetic which for physical models are developed to simulate industrial plants for studying and return the obtained innovation. Looking for such a research perspective a cold model UPF was installed at Nuclear Energy Department of UFPE for fluid dynamic parameters investigation by means of gamma ray transmission measurements. The nuclear nonintrusive technique is required in the *riser* for the solid concentration distribution measurements. Online measurements of pressure, flow and gamma intensity are carried out during UPF automated operation that is keeping by control a steady state regime. Such operational conditions are assumed in the hypotheses of mathematical models that air-FCC catalyst flow can be simulated as a circulating fluidized bed in a steady state regime. As for a pilot unit in industrial plants the solid injection in *riser* is very important as the catalyst concentration distribution maps the cracking reactions, therefore, determining process efficiency. In this work a new solid injector was developed, its capability in keeping stable operational conditions was demonstrated by pressure and gamma intensity measurements under automation control.

Keywords: control and automation, VPC valve, gamma ray transmission, FCC catalyst.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1– Esquema típico de processo e controle em unidade FCC.....	16
Figura 2 – Relações importantes de forças atuantes em um leito fluidizado.	24
Figura 3 – Esquema de medição da taxa de circulação de catalisador na UPF.....	25
Figura 4 – Esquemas de válvulas não mecânicas.	26
Figura 5 – Fluxograma de comunicação híbrida LabVIEW/CLP.....	31
Figura 6 – Esquema funcional da UPF.....	33
Figura 7 – Esquema do fluxo sinais na UPF.	34
Figura 8 – Equipamentos da UPF.....	35
Figura 9 – Equipamentos da UPF.....	36
Figura 10 – Equipamentos da UPF.....	36
Figura 11 – Interface de controle do supervisório.....	37
Figura 12 – Válvula rotativa.....	39
Figura 13 – Válvula gaveta instalada na UPF.....	40
Figura 14 – VPC I.....	41
Figura 15 – Problemas identificados na VPC I.....	43
Figura 16 – Projeto da VPC II em vista semi explodida.....	44
Figura 17 – Modelo virtual da VPC II instalada na UPF.....	45
Figura 18 – Diagrama de blocos para controle da pressão.....	46
Figura 19 – Diagrama de blocos do LabVIEW para aquisição de dados.....	49
Figura 20 - Fluxograma de operação e aquisição de dados na UPF.....	50
Figura 21 – Sistema automático de perfilagem gama.	53
Figura 22 – Instrumento virtual de controle do sistema de perfilagem gama.	54
Figura 23 - Ponto de acúmulo de catalisador na saída do riser.	55
Figura 24 – Esquema de instalação do injetor de ar no Joelho de saída do riser.	56
Figura 25 - Perfis de velocidade das fases para diversas condições de operação da UPF.	60
Figura 26 – Válvula VPC II instalada na UPF.	62
Figura 27 - Injetor instalado na curva de saída do riser.....	64
Figura 28 – Catalisador na região de saída do riser.....	64
Figura 29 – Válvulas utilizadas na linha de alimentação do injetor.....	65
Figura 30 – Medidas de pressão P1 para avaliação do injetor de ar.....	66

Figura 31 - Medidas de pressão P2 para avaliação do injetor de ar.....	66
Figura 32 - Medida de pressão P3 para avaliação do injetor de ar.	67
Figura 33 – Teste VPC II para vazão de 500 L/min.....	69
Figura 34 – Teste VPC II para vazão de 550 (L/min).	71
Figura 35 - Teste VPC II para vazão de 600 (L/min).....	73
Figura 36 - Teste VPC II para vazão de 650 (L/min).....	75
Figura 37 – Teste VPC II para vazão de 700 (L/min).	77
Figura 38 – Distribuição radial da densidade do catalisador medida com transmissão gama.....	79
Figura 39 - Perfil varredura gama para escoamento com pouco sólido.....	80
Figura 40- Perfil varredura gama para escoamento denso.	80
Figura 41 - Modelo de escoamento núcleo anular.	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relações importantes de forças atuantes em um leito fluidizado.....	19
Tabela 2 - Processos realizados para realizados de experimentos na UPF.	51
Tabela 3 – Experimentos para determinar a influência do injetor.....	57
Tabela 4 – Planejamento experimental VPC II.	58
Tabela 5 – Parâmetros geométrico e físico-químicos da UPF.	60

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos.....	14
1.1.1 Geral	14
1.1.2 Específicos.....	14
2. REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 O Processo de craqueamento FCC e controle aplicado	15
2.2 Scale-up projeto e construção de unidade piloto	18
2.2.1 Scale-up	18
2.2.2 Projeto piloto	21
2.2.3 Unidade Piloto a Frio - UPF.....	22
2.3 Controle da injeção de sólidos	23
2.3.1 Formas alternativas para determinação da taxa de circulação de sólidos.....	23
2.3.2 Modelagem de válvulas como injetores de sólidos	25
2.3.2.1 Válvulas não mecânicas	26
2.3.2.2 Válvulas mecânicas	27
2.4 Sistemas de controle em unidades industriais.....	29
2.4.2 Sistema de comunicação híbrida LabVIEW/CLP	30
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1 UPF reformada	32
3.1.2 Sistema supervisorio da UPF.....	37
3.2 Construção do injetor de sólidos – solicitação e evolução.....	38
3.2.1 Válvula rotativa	39
3.2.2 Válvula tipo gaveta manual	40
3.2.3 VPC I.....	41
3.2.4 VPC II.....	42
3.3 VPC inserida no sistema de controle do CLP	46
3.4 Modelagem do injetor de sólidos: Variáveis do processo	47
3.4.1 Medidas de pressão.....	47
3.4.2 Técnica do gradiente de pressão	48
3.4.3 Implementação do LabVIEW para aquisição de dados.....	49
3.4.4 Experimentos e sistema de aquisição de dados	50
3.4.5 Fração volumétrica de sólidos medida por transmissão gama	51

3.4.5.1 Sistema automatizado para medidas de transmissão gama	53
3.5 Operação e precisão requerida na UPF.....	55
3.6 Planejamento experimental com Injetor de ar e VPC II	57
3.6.1 Influência do injetor de ar no perfil de pressão do <i>riser</i>	57
3.6.2 Testes com a VPC II.....	58
3.6.3 Determinação do ponto de colapso em um leito fluidizado circulante.....	59
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
4.1 A VPC II configurada no controle da UPF	62
4.2 Testes da influência do injetor no <i>riser</i>	63
4.3 Testes e análise da VPC II na UPF	68
4.4 Medidas com transmissão gama.....	79
5. CONCLUSÃO	83
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	84
REFERÊNCIAS	85

1. INTRODUÇÃO

Unidades de Craqueamento Catalítico Fluidizado (FCC) estão presentes em várias refinarias de petróleo no mundo e são consideradas o coração da unidade de refino. Esse processo é utilizado na conversão de óleo pesado em uma faixa de hidrocarbonetos de elevado valor comercial incluindo, GLP, gasolina, querosene de aviação, etc.

Tipicamente uma unidade FCC é composta pelo reator chamado de *riser*, o regenerador e a colunada de retorno. O *riser* nada mais é que um tubo vertical onde ocorrem as reações de quebra das moléculas dos hidrocarbonetos num leito fluidizado formado por gás óleo e catalisador. O regenerador é um equipamento cuja função é recuperar o catalisador impregnado de hidrocarbonetos proveniente do *riser* através de um jato de oxigênio. A coluna de retorno fica entre o regenerador e o *riser*. Na sequência, o catalisador depois de utilizado como acelerador nas reações químicas do *riser* é reativado no regenerador, entra na coluna de retorno, passa pelo injetor de sólidos e finalmente retorna ao *riser*. Esse é o chamado ciclo do catalisador que é de extrema importância para as reações de craqueamento no *riser*.

Para manter o processo do FCC competitivo as pesquisas e o desenvolvimento tecnológico requeridos estão divididos em duas grandes linhas: a fluidodinâmica e a cinética das reações. Na primeira o objeto de estudo é fluxo multifásico constituído de substâncias líquidas, sólidas e gasosas. Na segunda são estudadas as reações químicas de quebra dos hidrocarbonetos. Esta divisão visa tornar o trabalho de pesquisa viável, pois o processo de FCC é bastante complexo. As informações deverão ser coletadas para fazer a simulação do processo industrial e por meio do *scale-up* introduzir inovações no FCC industrial. Para isso são construídos modelos físicos de laboratório e em escala piloto. Cada grupo de pesquisa constrói seu próprio modelo e segue uma estratégia de investigação de acordo com o seu objetivo. Nesse contexto foi construída uma Unidade Piloto a Frio (UPF) com controle automatizado realizando medidas em tempo real e com equipamentos para medidas de transmissão gama.

Esta dissertação está relacionada à área de pesquisa dos fenômenos fluidodinâmicos no processo FCC pois o objetivo do estudo desenvolvido é o controle da injeção de catalisador no *riser*. Na UPF, como não há reações de craqueamento a temperatura sistema encontra-se em nível ambiente desta forma não é necessário a utilização de tubos de aço para simular o ciclo do catalisador. Tubos de acrílico foram escolhidos para a construção da unidade a fim de proporcionar uma verificação visual do fluxo. Diferentes modelos matemáticos são utilizados para determinar a distribuição do catalisador ao longo do *riser* são encontrados na literatura.

No entanto devemos considerar que não existe um modelo padrão disponível na literatura, e todo o desenvolvimento realizado inclusive por *Computational Fluid Dynamics* (CFD) requer validação experimental dos modelos.

Técnicas nucleares são utilizadas para validar um modelo matemático de distribuição do catalisador no *riser*. Com a medida de atenuação da radiação ao longo de várias seções do tubo é possível obter os perfis axial e radial de sólidos e comparar com o modelo proposto. Na UPF foram instaladas três seções de teste com medidas em tempo real da pressão e da transmissão gama, ao longo do *riser*.

No circuito fluidodinâmico da UPF uma mistura de ar comprimido e catalisador forma um leito fluidizado circulante, que ascende no *riser*, e posteriormente segue para uma câmara de separação onde um conjunto de ciclones separa o catalisador do ar. Em seguida o ar é direcionado para fora do sistema e o catalisador segue para a coluna de retorno, passa pela válvula de controle e retorna ao *riser*. Esse é o ciclo do catalisador da UPF. A caracterização do leito fluidizado no *riser* é muito importante para o setor industrial, pois influencia diretamente no rendimento de uma unidade FCC. Basicamente, o controle do sistema deve ajustar a abertura da válvula de injeção de catalisador para garantir a formação de um leito fluidizado adequado em diferentes vazões de ar.

As válvulas de controle da injeção de catalisador precisam ser bastante resistentes as pequenas e abrasivas partículas de catalisador. Na UPF várias válvulas apresentaram problemas e deixaram de funcionar devido ao contato com o fluxo de catalisador. Válvula rotativa e válvula gaveta foram dois dispositivos testados na UPF para o controle da injeção de catalisador que não funcionaram por muito tempo. Após poucos meses de uso estas válvulas de controle apresentaram defeitos devido a penetração do catalisador nas partes mecânicas móveis das válvulas. Diante da necessidade, surgiu a ideia de construir, no laboratório, uma válvula cujo mecanismo de acionamento não entrasse em contato com o catalisador. Surgiu então a primeira versão da válvula de controle chamada VPC – *Valve for Pressure Control* (Válvula para o Controle da Pressão). Com a introdução da VPC I na UPF, se adicionou mais uma função ao sistema de automação e controle da unidade além de alterar o perfil de pressão ao longo da coluna de retorno até entrada na base do *riser*. Um controle tipo PID – Controlador Proporcional Integral e Derivativo foi inserido no CLP – Controlador Lógico programável da VPC I. Basicamente esse controle mantinha uma pressão no *riser* mudando a abertura da válvula. Devido a alguns problemas, que serão apresentados na seção 3.2.4, na configuração mecânica da VPC I esse método de controle se mostrou instável e uma nova válvula foi desenvolvida, a VPC II, com missão de solucionar o problema da injeção de catalisador na UPF.

A construção e instalação de um novo injetor de sólidos na UPF leva ao estudo dos problemas de estabilidade na faixa de operação do transporte de catalisador em fase densa e na região crítica o ponto de colapso.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

- Construir um injetor com partes mecânicas móveis livres do contato com o sólido e cuja configuração no controle automatizado possibilite operar a UPF em regime estacionário.

1.1.2 Específicos

- Projetar e construir uma válvula para injetar sólidos no *riser*, com atuador mecânico que não sofra abrasão devido ao contato com as partículas do catalisador, a concepção da válvula VPC.
- Definir as condições adequadas para configurar o controle avaliando as variáveis envolvidas na operação da válvula VPC.
- Estudar o método que permita a instalação da válvula no controle provavelmente modelando a função que governa esse processo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

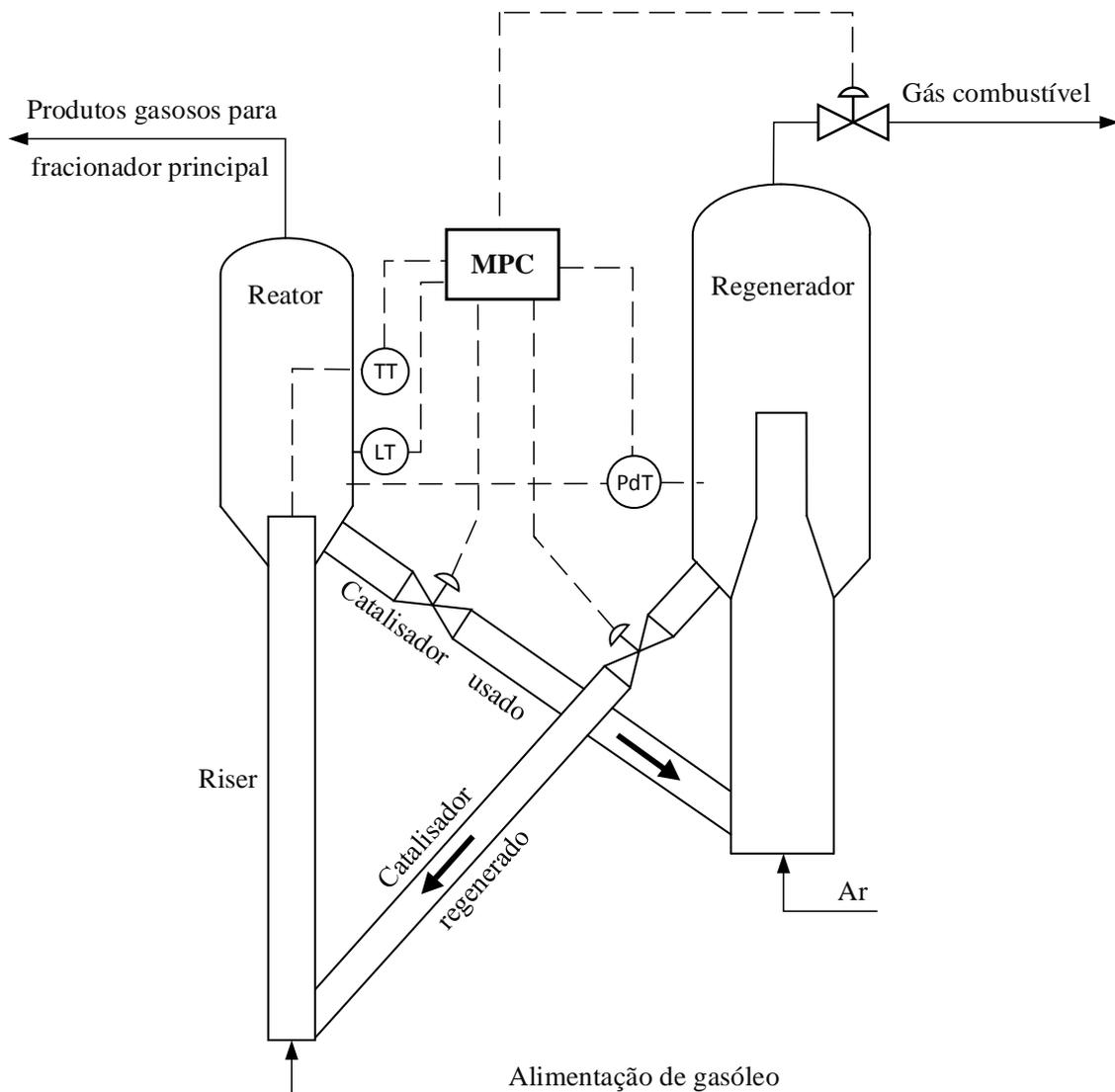
2.1 O Processo de craqueamento FCC e controle aplicado

Em refinarias de todo o mundo o processo FCC é largamente empregado, principalmente, no refino de petróleo constituído por longas cadeias de hidrocarbonetos. Como produto da reação de craqueamento há hidrocarbonetos de elevado valor agregado como a gasolina, GLP, querosene de aviação, entre outros. Segundo Chen (2003) 45% da gasolina produzida no mundo provém do FCC. Devido à grande quantidade de produtos nobres gerados numa unidade FCC, o processo é um fator de competitividade entre refinarias e muitos investimentos em pesquisas são realizados.

O *riser* é a peça chave numa unidade conversora tipo FCC pois nele ocorrem as reações de craqueamento catalítico. O *riser* é um tubo vertical cuja relação altura/diâmetro é elevada (normalmente a altura do *riser* varia entre 30 e 40 vezes o seu diâmetro), por onde passa uma mistura de gasóleo vaporizado, vapor d'água e catalisador sólido (SOUZA, 2004).

O catalisador circula num loop fechado que consiste em três partes principais *riser*, reator e regenerador que são de interesse industrial de pesquisa e desenvolvimento. Diversos trabalhos têm sido focados na modelagem e estratégias de controle do processo de FCC. Tradicionalmente os estudos do FCC estão baseados em modelos empíricos que cobrem muito bem a necessidade industrial, mas, quando ocorrem mudanças nas condições de operação a validade desses modelos pode falhar. Muitos desses modelos não descrevem variações de variáveis importantes como os efeitos de pressão como os propostos por Balchen e Strand (1992) e Hovd e Skogestad (1993). Um esquema de processo típico de controle do FCC, é mostrado na Figura 1.

Figura 1– Esquema típico de processo e controle em unidade FCC.



Fonte: Adaptado de Jia et al. (2003).

O processo ilustrado na figura acima utiliza um modelo de controle preditivo (MPC) proposto por Jia et al. (2003). No esquema observamos um quadro central de controle MPC ligado a atuadores de sensores do sistema. As linhas tracejadas indicam ligações elétricas. Como sensores existem o transmissor de nível (LT), transmissor de temperatura (TT) e um transmissor diferencial de pressão ligado entre o reator e regenerador (PdT). Os atuadores do sistema são três válvulas uma localizada na linha que liga o reator ao regenerador, outra na linha que fica entre o regenerador e o *riser* e finalmente uma na saída do gás combustível. A estratégia de controle inclui o processo de identificação que iterativamente seleciona um modelo para a estrutura do fluxo multifásico, compara o melhor modelo e avalia as propriedades do modelo para ver se são satisfatórias. Entre os ganhos do FCC com as pesquisas de controle, é descrito a estabilidade da operação, a redução do impacto do controle nas oscilações do processo e o

tempo de assentamento. Isto é, o tempo para o sistema permanecer nos limites de uma certa percentagem da amplitude da entrada.

O controle adequado de uma unidade tipo FCC é fundamental para garantir uma produção eficiente de hidrocarbonetos desejados como também a segurança na unidade. Várias estratégias diferentes são adotadas, por exemplo, Jia et al. (2003) propôs um controle baseado em sistema de suporte a tomada de decisão. Nesse modo o sistema de controle seleciona o modelo de sistema adequado para as condições operacionais da planta durante a operação. Assim, esse sistema se difere de um controle clássico onde o modelo inserido no controle é fixo. Como resultado as oscilações de produção numa unidade tipo FCC ficam sob controle garantindo uma produção otimizada. Há também trabalhos envolvendo controladores clássico como desenvolvido por Ali et al. (1997) onde três controladores de ação proporcional integral foram utilizados no controle do processo.

Numa etapa mais avançada dos estudos sobre controle do processo FCC estão os modelos de identificação e controle preditivo baseados em sistemas com *Multiple In Multiple Out* –MIMO. Nesse tipo de controle a resposta do sistema em operação são gravadas pelo sistema de controle, como treinamento do algoritmo de inteligência artificial, para servir de suporte ao posterior processo de tomada de decisão. Durante o treinamento da rede, algoritmos baseados em redes neurais podem ser utilizados para prever o comportamento do sistema no estante seguinte. Como exemplo de controle avançado de uma unidade FCC pode-se citar o trabalho desenvolvido por Viera et al. (2005) onde uma análise de sistema com múltiplas entradas e múltiplas saídas foi implementado num auxílio de lógica fuzzy num modelo MPC.

De um modo geral o controle de uma unidade FCC industrial é bastante complexo pois envolve o monitoramento de vários parâmetros como pressão e temperatura em toda a unidade para uma produção segura e eficiente. Os modelos de controle baseados em MPC podem ser avaliados como substitutos para controles clássicos afim de otimizar a produção.

2.2 Scale-up projeto e construção de unidade piloto

2.2.1 Scale-up

Uma unidade tipo FCC está incluída em um estudo mais geral de um sistema de Leito Fluidizado Circulante – LFC, entre elas as unidades HFCFB- High Flux Circulation Fluidized Bed (Leito Fluidizado circulante de alto fluxo) são requeridas para operação em elevadas pressões, contribuindo para alta qualidade de fluidização, mistura uniforme de sólidos e gases como também uma alta taxa de reações químicas no *riser* (YIN et al., 2013). Em geral, o *scale-up* para grandes aplicações comerciais é um processo gradual de elevado custo, pois, é necessário construir e testar diferentes tamanhos em escala piloto, como também a operação de modelos a frio. Na maioria dos casos, o projeto final pode levar vários anos para atingir a plena capacidade de produção. A principal razão para esse problema de projeto está no comportamento do escoamento no LFC que é complexo e muito sensível ao *scale-up* e condições específicas de operação.

Em uma unidade tipo FCC real a forma com que o catalisador é distribuído nas seções do *riser* e ao longo de seu comprimento influencia diretamente nas reações de craqueamento. Dessa forma, entender, criar e validar modelos que descrevem o escoamento no interior do *riser* servem como base para melhorias e conseqüentemente aumento do rendimento uma unidade real.

Pesquisadores em todo o mundo projetam suas próprias unidades experimentais com a finalidade de estudo e desenvolvimento de soluções para escala industrial. Estas unidades precisam ser construídas obedecendo concepção de projeto e de *scale-up*, para que a inovação obtida retorne ao processo industrial. Há ainda pesquisas puramente teóricas seja no que tange a cinética das reações, operações de controle e a fluidodinâmica do escoamento gás-sólidos. A junção dos conhecimentos teóricos validados em unidades experimentais produz resultados importantes que podem ser diretamente aplicados em uma planta industrial.

Os processos industriais que envolvem reações químicas em conjunto com transferência de massa, calor e momento são dependentes de escala (ZLOKARNIK, 2002). Isso significa que muitas das características importantes de operação do processo variam com o tamanho da unidade. Normalmente, o desenvolvimento de novas tecnologias para sistema de leito fluidizado envolve estudo de modelos em escala de bancada, planta piloto maior e uma versão

maior de demonstração (GLICKSMAN, 2003). Com o conhecimento adquirido nos modelos de pesquisa novos projetos industriais podem ser desenvolvidos.

Um modelo em escala é um modelo experimental menor do que uma planta comercial, porém com o mesmo comportamento hidrodinâmico. Nos estudos sobre FCC os modelos em escala utilizam ar a temperatura ambiente para fluidização das partículas sólidas. Existem várias aproximações para o desenvolvimento de correlações de *scale-up*. Uma forma simples é a adimensionalização das equações governantes. Para o projeto de um modelo de leito em escala, a relação entre as forças importantes que agem sobre o sistema são as mesmas de uma instalação real. Assim se a relação de forças que agem sobre uma partícula em um modelo de leito em escala é a mesma relação de um leito industrial, então a trajetória do movimento da partícula deve ser a mesma em ambos os leitos (GLICKSMAN, 2003). Um conjunto de relações de escala é dado na Tabela 1.

Tabela 1 – Relações importantes de forças atuantes em um leito fluidizado.

$\rho_s U_0 d_p / \mu$	Inércia da partícula/ Força viscosa do gás
$\rho_f U_0 L / \mu$	Inércia do gás/ Força viscosa do gás
U_0^2 / gL	Inércia / Força da gravidade
ρ_s / ρ_f	Inércia do sólido/ Força de inércia do gás
	Forças de Superfície - Colisão, adesão; Forma discutível
	Importantes relações adicionais
$G_s / \rho_s U_0$	Fluxo volumétrico de recirculação de sólidos/ Taxa volumétrica do fluxo de gás
L/D	Altura do leito/ Diâmetro do leito
DMP	Distribuição média partículas, χ_1 (fração mássica de d_i) para d_i/d_p (diâmetro médio de sólidos) para todos d_i 's
φ	Esfericidade da partícula

Fonte: Adaptado de Glicksman, 2003.

Estas relações expressas em números adimensionais devem ser seguidas quando se pretende fazer um *scale-up* do processo de um nível piloto para o industrial. Baseado nelas, os pesquisadores estudam o comportamento fluidodinâmico do escoamento, em unidades relativamente pequenas, e desenvolvem soluções que são aplicadas comercialmente.

Dimensionamento bem-sucedido pode ser avaliado por diversas ferramentas de validação de análises de séries temporais clássica até novos métodos adaptados a partir da teoria do caos. Ao longo das últimas décadas, a modelagem com números adimensionais foi aplicada

a vários leitos fluidizados na indústria e na pesquisa. Enquanto em estudos mais antigos o *scale-up* é considerado bem-sucedido, em estudos mais recentes essa abordagem tradicional de escala tem sido repetidamente questionada.

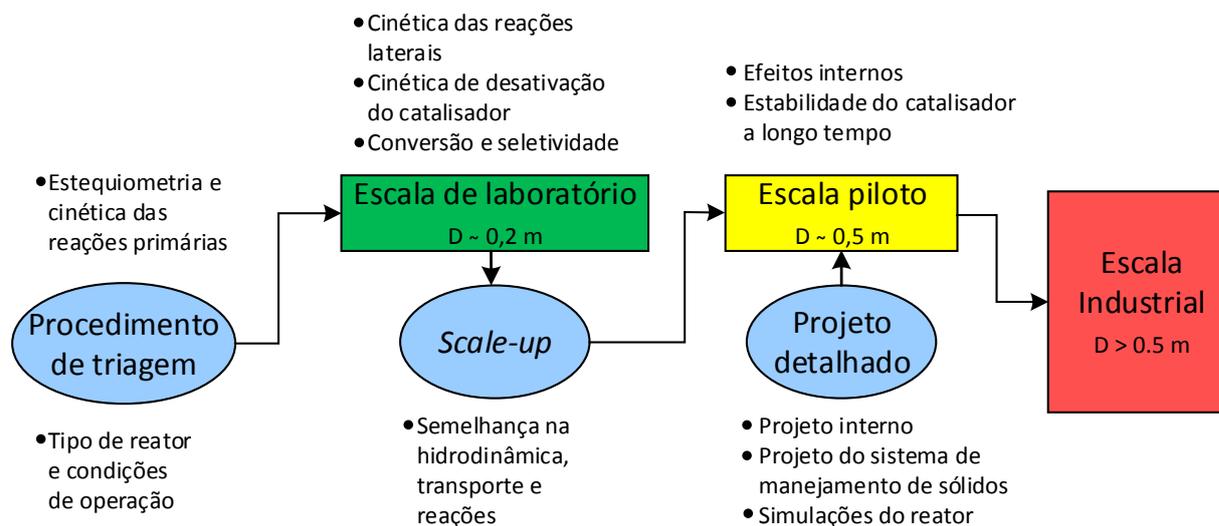
As razões para críticas emergentes são múltiplas. Em particular, a falta de graus de liberdade no projeto do reator e conjuntos incompletos de relações de escala em relação ao fenômeno essencial como o efeito de parede e as interações entre partículas são muitas vezes criticados. No entanto, devido à falta de alternativas e desde que as mudanças de escala são pequenas, o *scale-up* adimensional tradicional é ainda uma rota viável para o sucesso de um processo de *scale-up* de um reator em leito fluidizado.

De acordo com (MATSEN, 1996), o desenvolvimento de um novo processo comercial num reator de leito fluidizado envolve muitas simplificações e aproximações. Nesse assunto, o segredo do sucesso, mais do que da precisão e sofisticação das simulações computacionais depende da compreensão dos fenômenos e da incerteza envolvida.

Como alternativa, a relação entre o parâmetro (tamanho da bolha, densidade da partícula, fração volumétrica de sólidos) e o diâmetro do leito deve ser conhecida de modo a fazer previsões confiáveis para uma maior escala. Além disso, o tamanho da partícula pode afetar a taxa de mudança do parâmetro de escala. Um parâmetro de escala em um leito formado por partículas do grupo Geldart A normalmente atinge seu valor constante em menores diâmetros do leito do que o mesmo parâmetro em leito Geldart B. Uma explicação é que em leitos Geldart B as bolhas crescem muito e seus agregados são mais prováveis de ocorrer do que para leitos Geldart A. Portanto, leitos fluidizados com partículas Geldart B são mais difíceis de escalar do que com Geldart A (KRISHNA e BATEN, 2001).

Sob o pré-requisito que a cinética da reação é conhecida, um roteiro para um processo de *scale-up* sugerido é mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Procedimento para *Scale-up*.



Fonte: Adaptado de Rüdüsüli et al., 2012.

2.2.2 Projeto piloto

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 LFC. 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. O projeto da unidade piloto a frio, tem como objetivos (DEROUIN et al., 1997):

- Determinar as características hidrodinâmicas relevantes para um *riser* FCC.
- Combinar esses dados com os resultados de uma investigação da cinética das reações do craqueamento catalítico para determinar os rendimentos dos diferentes produtos de craqueamento.
- Verificar os resultados do modelo com dados obtidos em um *riser* comercial.

O trabalho citado de Derouin et al. (1997), evoluiu a partir de um modelo piloto. A investigação sistemática do escoamento no *riser* foi feita em um modelo frio; no entanto,

medições foram feitas em plantas FCC, cujo *riser* pode ser modelado em duas dimensões por um fluxo vertical sem fluxo contrário para gases e catalisador e perfis radiais de velocidade e concentração. Um único coeficiente de dispersão radial simples é capaz de explicar o comportamento do gás em toda a área da seção transversal do *riser*. Os parâmetros foram medidos por meio da tomografia gama: Esta técnica permite determinar os perfis axial e radial de concentração de sólidos em uma unidade piloto a frio como também numa unidade industrial. Detalhes são encontrados em Martin et al. (1992a).

O modelo de escoamento no *riser* foi obtido pela contribuição das medidas de transmissão gama que deram acesso aos valores locais e mostraram a estrutura clássica núcleo-anelar: próximo a parede, a concentração de sólidos é muito maior do que no centro do *riser*. Isso confirma as observações feitas anteriormente por Martin et al. (1992b) e Wong et al. (1992): a concentração média de sólidos diminui da parte inferior para metade a altura do *riser*; na parte superior da coluna, 2 m a montante do cotovelo, um aumento da concentração de sólidos é observado, sendo considerado uma evidência da estrutura núcleo-anelar.

A construção de uma unidade piloto a frio tipo FCC tem como objetivo geral investigar a fluidodinâmica do *riser*. As medidas dos parâmetros e sua utilização nos modelos fluidodinâmicos para descrever o escoamento do leito fluidizado circulante CFB é o caminho para compreender a estrutura núcleo-anular do *riser*. Em uma unidade piloto ou industrial a injeção de sólidos no *riser*, em grande extensão, governa a fluidodinâmica do processo. Para cumprir o objetivo de investigar a fluidodinâmica numa unidade piloto é necessário construir um injetor de sólidos adequado. Para configurar o injetor no controle da unidade automatizada, um modelo funcional é requerido, cujas variáveis são perfil de pressão e fração volumétrica de sólidos no *riser*. Problemas do FCC industrial estão conectados a unidade piloto a frio e o controle do processo é provavelmente um dos maiores desafios.

2.2.3 Unidade Piloto a Frio - UPF

Com o objetivo de estudar a fluidodinâmica do FCC por meio da aplicação de técnicas nucleares foi projetada e construída a UPF - unidade piloto a frio no Departamento de Energia Nuclear da UFPE. O projeto obedeceu a requisitos de planta piloto e *scale-up*, os estudos realizados têm sido publicados, por exemplo, na tese de Lima Filho (2015). A UPF construída, tem um *riser* com 6,2 m altura e diâmetro interno de 92 mm em acrílico por onde escoam uma mistura de ar comprimido e catalisador. Semelhante a unidade industrial ocorre o ciclo do catalisador, mas como

não há reações químicas, o uso do regenerador não se faz necessário. O esquema da UPF montada no laboratório está mostrado na Figura 6.

A possibilidade de *scale-up* com números adimensionais, está equacionada por meio da caracterização do escoamento na UPF com números adimensionais (HUI et al., 2000; WONG et al., 1992). Nesse trabalho o catalisador de FCC em circulação na UPF, foi estudado de acordo com a caracterização da partícula para o *scale-up*, baseada na referência citadas anteriormente em Krishna e Baten (2001). A necessidade de trabalhar o modelo físico a UPF, visando à precisão nas medidas das variáveis e no controle da operação segue conceitos estabelecidos na literatura: o sucesso do estudo depende menos da sofisticação das técnicas utilizadas e mais da compreensão e solução das incertezas envolvidas (MATSEN, 1996). Os erros das medidas têm sido estudados e a avaliação da incerteza em alguns métodos está descrita em Santos et al. (2011) e Dantas et al. (2013).

2.3 Controle da injeção de sólidos

Embora as reações químicas sejam as principais forças do processo químico, em muitas circunstâncias a chave do sucesso na operação está associada ao sistema de transporte de sólidos (KNOWLTON, 2005). Isso é muito importante num sistema de Leito Fluidizado Circulante - LFC, onde o processo depende de uma rápida e confiável circulação de sólidos.

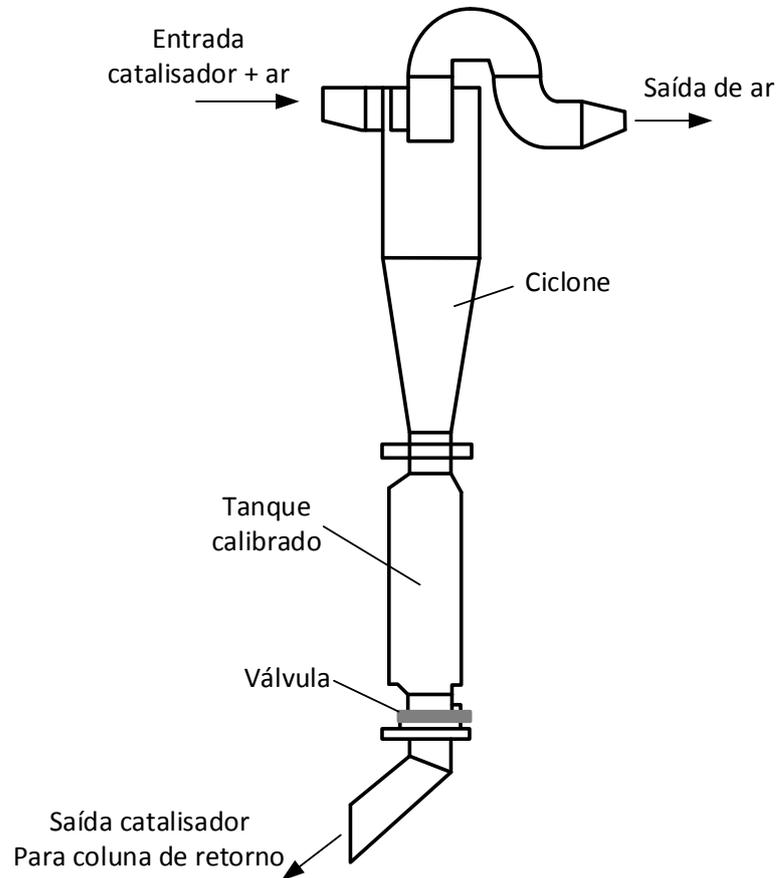
Algumas soluções para o desafio da medição da taxa de circulação de catalisador são baseadas em dispositivos e técnicas que envolvem modificações físicas no circuito fluidodinâmico de uma unidade experimental. Porém alguns modelos matemáticos para os dispositivos de controle de injeção de sólidos podem fornecer boas aproximações para taxa de circulação de sólidos.

2.3.1 Formas alternativas para determinação da taxa de circulação de sólidos

No circuito fluidodinâmico de um leito fluidizado circulante em geral existem sensores de pressão e umidade, controlador e medidor de vazão de ar, mas não há diretamente um equipamento capaz de quantificar a taxa de circulação de sólidos. Para resolver esse problema alguns outros pesquisadores criaram soluções alternativas, como no caso de Grieco e Marmo (2006). Na unidade experimental desenvolvida por esse pesquisador o catalisador ao sair do ciclone era direcionado para um vaso de volume calibrado que possuía uma válvula tipo gaveta

no fundo. Quando todo o volume era preenchido pelo catalisador a válvula era aberta liberando o fluxo para coluna de retorno. Esse dispositivo está ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Relações importantes de forças atuantes em um leito fluidizado.

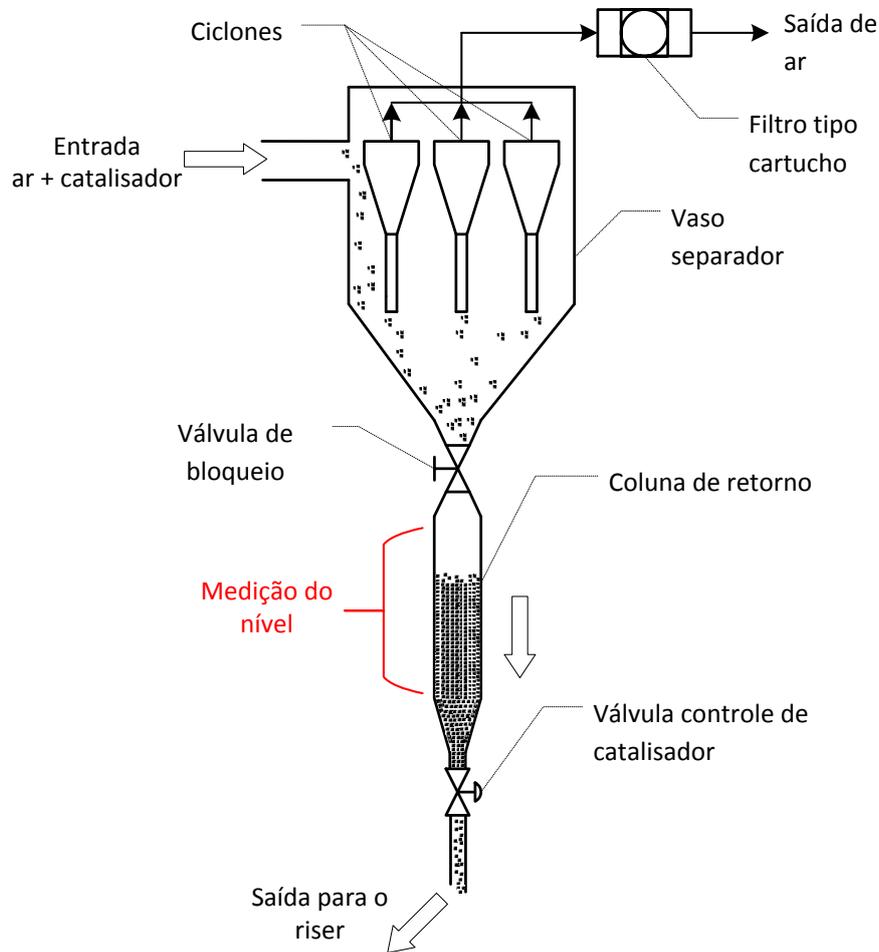


Fonte: Adaptado de Grieco e Marmo, 2006.

No dispositivo apresentado na esquematicamente na Figura 2, a taxa de circulação do catalisador é obtida pela relação do volume pelo tempo necessário para preencher o volume tanque calibrado. Na prática ao interromper o fluxo de catalisador para medição, a taxa de circulação de sólidos diminui lentamente, devido a diminuição da altura de sólidos na coluna de retorno.

Solução semelhante foi adotada por Lima Filho (2014). Nesse caso o fluxo de catalisador entre o ciclone e a coluna de retorno foi interrompido por uma válvula de bloqueio e a variação no nível de catalisador, abaixo da válvula, na coluna de retorno foi medida com o tempo. Esta solução está representada esquematicamente na Figura 3.

Figura 3 – Esquema de medição da taxa de circulação de catalisador na UPF.



Fonte: Próprio autor.

No esquema da Figura 3 a medição do nível foi realizada visualmente com auxílio de uma escala milimétrica colada na parede do tubo de acrílico. Novamente surge o problema gerado pela interrupção do fluxo. Não somente a taxa de circulação de sólidos diminui com o tempo, mas todo o perfil de pressão do sistema é alterado.

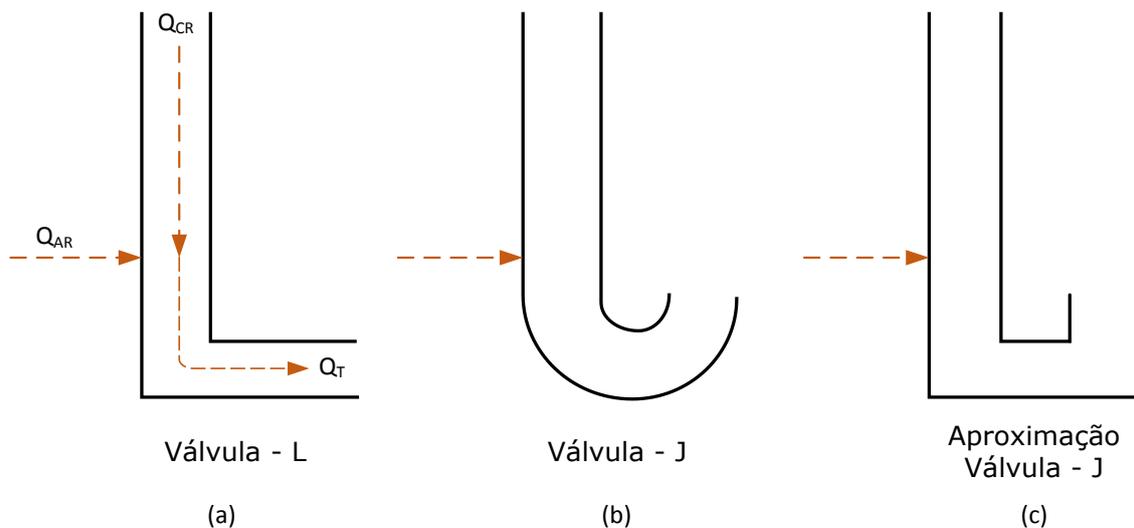
2.3.2 Modelagem de válvulas como injetores de sólidos

Existem vários tipos de válvulas de controle, que estão divididas em dois grupos: não mecânicas e mecânicas. As válvulas não mecânicas possuem uma configuração fixa, ou seja, o orifício por onde circula o fluxo não muda de dimensão. Por outro lado, as válvulas mecânicas, podem ser ajustadas, abertas ou fechadas, por meio de comandos externos.

2.3.2.1 Válvulas não mecânicas

O fluxo de sólidos através de um dispositivo não mecânico e controlado pela quantidade de ar injetado a nele (YAZDANPANAHI et al., 2012). Os modelos mais comuns de válvulas não mecânicas são as do tipo L, e do tipo J como ilustradas na Figura 4.

Figura 4 – Esquemas de válvulas não mecânicas.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 4 (c) é possível observar a configuração mais simplificada da válvula J feita apenas de trechos retos de tubos. As principais diferenças entre esses dispositivos de controle são a sua forma e a direção de descarga de sólidos. Ambos os dispositivos operam com os mesmos princípios. O fluxo de sólidos através da válvula ocorre devido a força de arrasto nas partículas produzida pelo gás de aeração. Esses tipos de válvulas possuem algumas vantagens são elas: Não possuem partes mecânicas móveis que estão submetidas a erosão. Essa característica é bastante útil quando se a operação ocorre em elevadas temperaturas e pressão. Baixo custo de fabricação pois é composta de tubos e acessórios. Facilidade de fabricação e não necessidade de manutenção são características atrativas para válvulas deste tipo.

Válvulas não mecânicas têm maior eficiência de operação com materiais de diâmetro médio entre 100 até 5000 microns (KNOWLTON, 2005). Esses materiais estão classificados no Grupo de Geldart B e D. Esses materiais de grande diâmetro médio, funcionam bem em válvulas não mecânicas misturados com pequenas partículas afim de diminuir os vazios da

mistura de sólidos, aumentando o arrasto quando o ar é injetado, facilitando dessa forma o fluxo pela região de restrição.

De um modo geral as partículas do Grupo A, segundo a classificação de Geldart (1973), com diâmetro médio entre 30 até 100 micrómetros não funcionam bem com as válvulas não mecânicas (KNOWLTON, 2005). Partículas desse grupo devido a sua elevada porosidade se mantêm fluidizadas por um determinado tempo na coluna de retorno, dificultando assim o controle por uma válvula mecânica.

2.3.2.2 Válvulas mecânicas

Comumente utilizadas na indústria esse tipo de válvula tem como principal característica partes moveis com a função de controlar o fluxo que passa através de sua cavidade. Essas válvulas podem ser operadas manualmente ou automaticamente. Quando operadas de forma automática esses dispositivos podem ser acionados por atuadores pneumáticos, hidráulicos, elétricos ou eletrohidráulicos.

No cenário do controle de injeção de sólidos os principais tipos de válvulas mecânicas utilizadas são as válvulas gaveta, válvulas borboletas, válvulas rotativas e fusos transportadores. Devido a elevada importância desses dispositivos no sistema de transporte de sólidos vários artigos sobre o assunto são facilmente encontrados na literatura. Por exemplo, Grieco e Marmo (2006) estudou a queda de pressão em uma válvula do tipo borboleta.

Como alternativa a modelagem do escoamento em válvulas mecânicas constitui uma solução para determinar a taxa de circulação de catalisador. Modelos matemáticos para o escoamento em leito fluidizado podem ser relacionados diretamente com o fluxo na válvula. Por exemplo, a expressão proposta por Davidson (2000), fornece uma relação entre velocidade de sólidos no *riser* e a taxa de circulação de catalisador (Equação 1).

$$u_s = \frac{m}{\rho_s A(1 - \varepsilon)} \quad (1)$$

onde u_s é a velocidade dos sólidos no *riser* [m/s], ρ_s é a densidade do catalisador [Kg/m³], m é taxa de circulação do catalisador [kg/s], A é a área da seção transversal do *riser* e ε

corresponde a fração volumétrica de vazios. Reescrevendo esta equação em função de m é obtida a massa que passa pela válvula (Equação 2).

$$m = u_s \rho_s A (1 - \varepsilon) \quad (2)$$

Com auxílio de alguns dados obtidos experimentalmente pode calcular a taxa de circulação de catalisador pela Equação (2) em função da abertura da válvula de controle. Mas para que esse cálculo seja preciso, o funcionamento da válvula deve ser uniforme, ou seja, a vazão não deve variar para uma mesma abertura.

Outra possibilidade de modelagem da válvula é conhecendo a queda de pressão que o fluxo sofre ao passar por ela e as propriedades do sólido. Muitos autores abordam o assunto da taxa de descarga de sólidos em orifícios. O trabalho pioneiro nessa linha de pesquisa foi publicado por Beverloo et al. (1961) cujo objetivo foi analisar o fluxo de diferentes materiais particulados por orifícios. Em seguida Jones e Davidson (1965) analisou o fluxo de partículas através de orifícios em um leito fluidizado. A correlação da queda de pressão com a taxa de circulação do catalisador m_{sol} proposta por Jones e Davidson (1965) admite a mistura gás-sólido como um líquido imiscível (Equação 3):

$$\Delta P = \left(\frac{m_{sol}}{C_0 \cdot A_0} \right)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot \rho_0} \quad (3)$$

onde C_0 é o coeficiente de descarga do orifício, que para orifícios redondos é assumido com $C_0 = 0.55$ e ρ_0 é densidade média de sólidos [Kg/m^3], que é calculada por $\rho_0 = \rho_{sol} \cdot (1 - \varepsilon)$, ΔP é a diferença de pressão a montante e a jusante da válvula e ρ_0 densidade aparente de sólidos em condição de mínima fluidização [Kg/m^3]. Contudo as partículas solidas precisam estar numa condição de mínima fluidização, diferentemente das condições experimentais de Beverloo et al. (1961), onde não havia fluidização.

Judd e Dixon (1976) estudou o fluxo de partículas através de um orifício circular localizado na parte inferior da coluna de retorno em uma unidade piloto tipo FCC. Eles modificaram a correlação de Jones e Davidson (1965) para levar em conta o momento do leito acumulado acima do orifício de descarga (Equação 4):

$$\Delta P = \left(\frac{m_{sol}}{C_0 \cdot A_0 \left[A_{sd}^2 / (A_{sd}^2 - A_0^2) \right]^{0.5}} \right)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot \rho_0} \quad (4)$$

onde A_{sd} é a área da seção transversal do tubo na coluna de retorno.

2.4 Sistemas de controle em unidades industriais

Instalações de processamento normalmente utilizam um computador ou um CLP como o coração do sistema de controle (DUNN, 2013). No CLP está embarcada a lógica do controle responsável pela operação automática da planta. O sistema do controlador é capaz de controlar malhas de controle analógicas e malhas digitais. As malhas de controle individuais não são independentes em um processo, mas sim interdependentes, sendo que muitas variáveis medidas podem ser monitoradas e muitas variáveis manipuladas podem ser controlada simultaneamente.

A função de um controlador é comparar uma grandeza de saída do processo com a grandeza de referência (valor desejado), determinar o desvio e produzir um sinal de controle para reduzir o desvio a zero ou a um valor pequeno (OGATA, 2012). A ação de controle é a forma com que o controlador gera o sinal de controle.

Em sistemas de CLP são encontradas funções de controle do tipo Proporcional Integral Derivativa – PID. Essas funções estão disponíveis no ambiente de programação do controlador bastando apenas o usuário configurar os ganhos desejados. Na sua atuação, o controlador PID emprega três ações de controle baseadas no sinal de erro: Proporcional (P), Integral (I) e Derivativa (D). Essas ações são usadas de forma isolada (P) ou combinadas (PI, PD ou PID) e estão descritas na Equação 5, pela lei de controle PID, na forma paralela ideal:

$$u(t) = k_c \left(e(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t e(t) dt + \tau_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (5)$$

onde k_c , τ_I e τ_D são denominados de parâmetros de sintonia e ponderam a contribuição dos respectivos termos na atuação do controlador PID, e $u(t)$ está sob a forma de variável de desvio (Equação 6):

$$u(t) = u'(t) - u_s \quad (6)$$

onde u_s é denominado Bias do controlador, isto é, o sinal de controle na ausência do erro, e $u(t)$ representa o valor de saída do controlador.

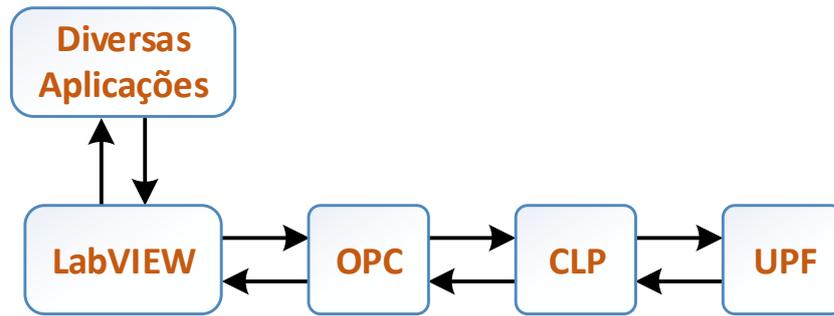
2.4.2 Sistema de comunicação híbrida LabVIEW/CLP

O *Laboratory Virtual Instrument Workbench*- LabVIEW é uma poderosa ferramenta para o desenvolvimento de aplicações comerciais, industriais e científicas. Nesse programa de computador fornecido pela empresa americana National Instruments, o ambiente de programação é totalmente gráfico o que facilita a criação de aplicações. Podem ser criados Instrumentos Virtuais (VI) exclusivos para utilização em controle, automação, aquisição de dados, testes de equipamentos, em resumo, esse programa de computador oferece suporte a troca de dados entre diferentes linguagens e protocolos de comunicação nos mais variados tipos de *hardware*.

Originalmente o CLP, possui restritas possibilidades de comunicação com outras aplicações e operam em redes dos fabricantes. Em sua memória são executados continuamente programas escritos na linguagem *Ladder*. Em aplicações gerais da indústria, seja no controle de UPF ou qualquer outra aplicação, esses dispositivos desempenham muito bem o papel de controle da planta. Compatibilidade com sinais de entrada/saída analógicos e digitais não é problema para esse tipo de equipamento. Porém em aplicações mais complexas onde há necessidade de troca de dados entre diferentes aplicações e funções de controle mais complexas, o sistema do CLP apresenta limitações.

Para superar as limitações do CLP uma junção de suas clássicas capacidades com os recursos espaciais do LabVIEW, pode ser realizada por meio do protocolo de comunicação OPC – *OLE for Process Control*. Através dessa janela de comunicação pode-se trocar dados entre os parâmetros da memória do CLP e os VI's. Assim uma aplicação criada no LabVIEW pode fazer interface com outros programas do sistema operacional e controlar diretamente e indiretamente as saídas/entradas do CLP como também ler/escrever em todas as variáveis armazenadas na memória do controlador. Esquematicamente o fluxograma de comunicação entre as variadas plataformas está ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Fluxograma de comunicação híbrida LabVIEW/CLP.



Fonte: Próprio autor.

No fluxograma bloco das diversas aplicações está localizado acima do bloco LabVIEW para representar o crescimento vertical das possibilidades de troca de dados.

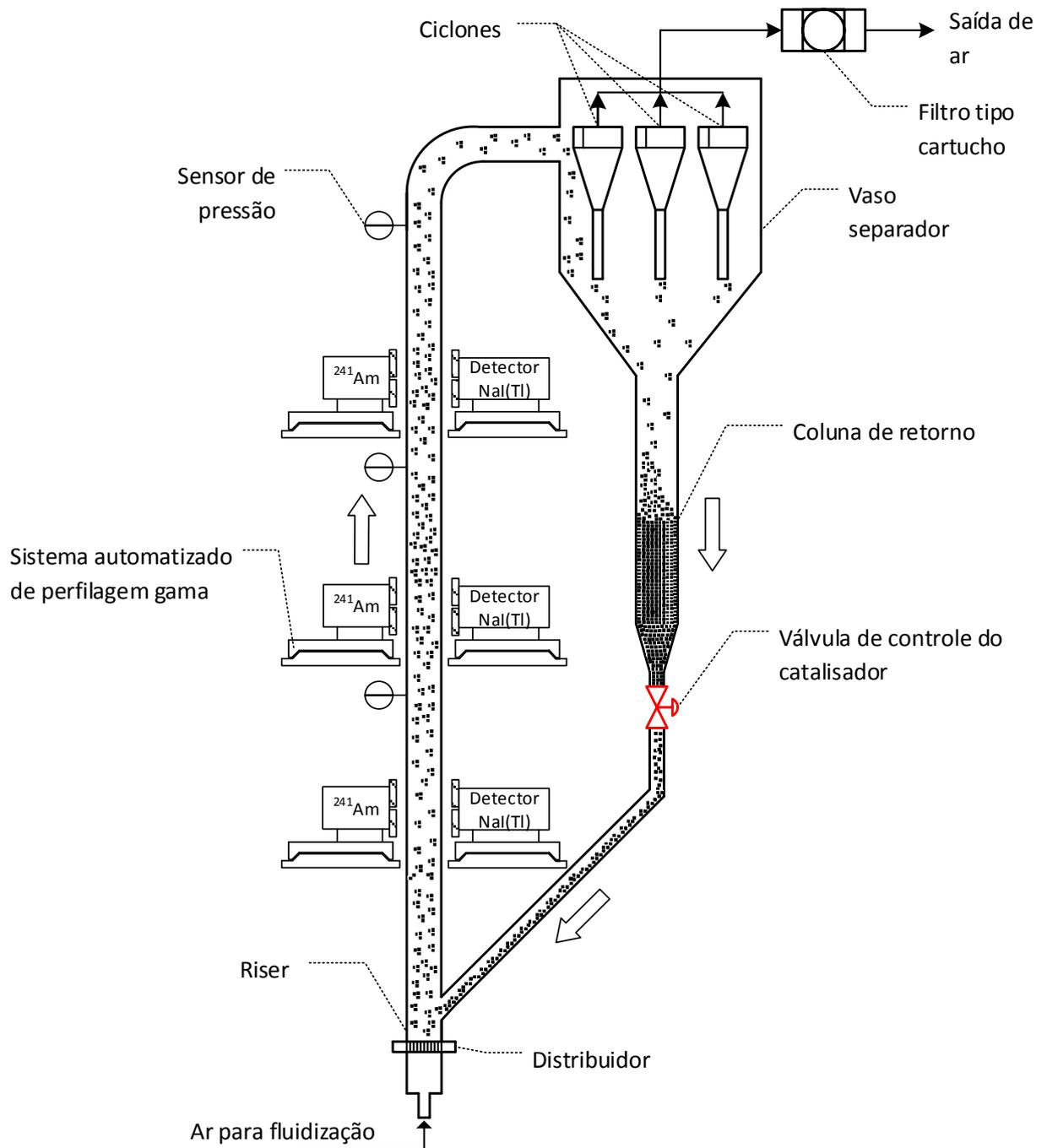
3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 UPF reformada

A Unidade Piloto a Frio (UPF) foi reformada visando reduzir incertezas do processo, mais especificamente na avaliação do inventário do catalisador e na estabilidade do sistema de medidas durante a injeção de sólidos. Nessa direção foram detectados e eliminados os pontos de estagnação do sólido em circulação, como será descrito na Seção 3.5 . Foram desenvolvidos procedimentos para avaliação da variação de massa do catalisador em circulação e aperfeiçoamento da válvula VPC, um novo tipo de injetor de sólidos. Esquemáticamente a UPF está apresentada na Figura 6.

No esquema da UPF da Figura 6 uma mistura de ar comprimido e catalisador formam um leito fluidizado circulante, que ascende no *riser* e posteriormente segue para uma câmara de separação onde um conjunto de ciclones separa o catalisador do ar. Em seguida o ar é liberado para a atmosfera e o pó segue por gravidade para a coluna de retorno. Prosseguindo o catalisador passa pela válvula de controle da injeção do catalisador e retorna para o *riser*. Esse é o ciclo do catalisador na UPF.

Figura 6 – Esquema funcional da UPF.

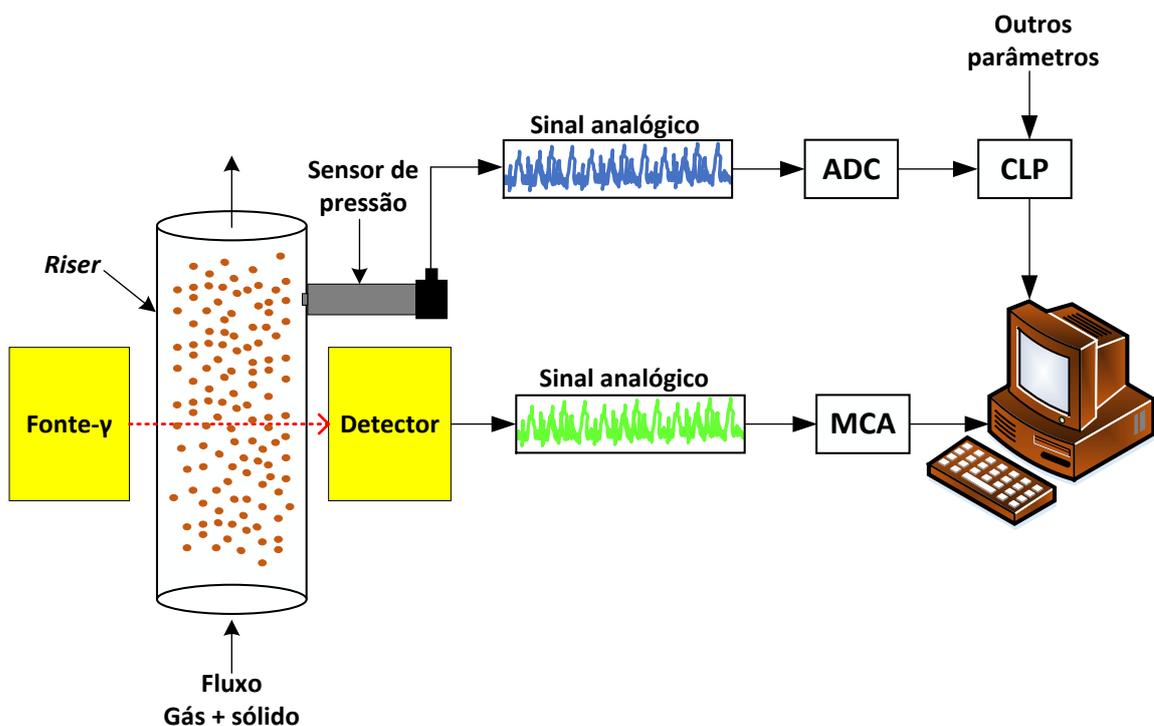


Fonte: Próprio autor.

Diversos equipamentos são utilizados na UPF para garantir o funcionamento do sistema em perfeitas condições de estabilidade e confiabilidade. No comando do sistema está o Controlador Lógico Programável-CLP da modelo SLC 500 fornecido pela Allen-Bradley, trata-se de um equipamento industrial de elevada confiabilidade de operação. Estão ligados a esse CLP alguns sensores e atuadores do sistema de controle. Os sensores do sistema são: pressão, umidade, temperatura e fluxo de ar. Os atuadores são: válvulas de diafragma com acionamento por solenoide, válvula de injetor de sólidos, controlador do fluxo de ar e o desumidificador. Para comunicar com esses diversos tipos de sensores e atuadores o CLP está equipado com módulos adicionais de capazes de interpretar a sinais de entrada na forma analógica ou digital, bem como gerar sinais de controle analógicos ou digitais.

Em paralelo ao controle do sistema fluidodinâmico existe o sistema de medidas com transmissão gama. Esse sistema consiste em três conjuntos de mesas equipadas para perfilagem gama instaladas ao longo do *riser*, localizadas a 0,65m, 1,38m e 3,25m em relação a base do *riser* respectivamente. Nesse sistema uma fonte de ^{241}Am é utilizada para as medidas de transmissão gama através do fluxo bifásico formado por ar e catalisador. De um modo geral, tanto as informações coletadas no CLP quanto os dados da radiação estão disponíveis no computador de controle da UPF, como ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Esquema do fluxo sinais na UPF.

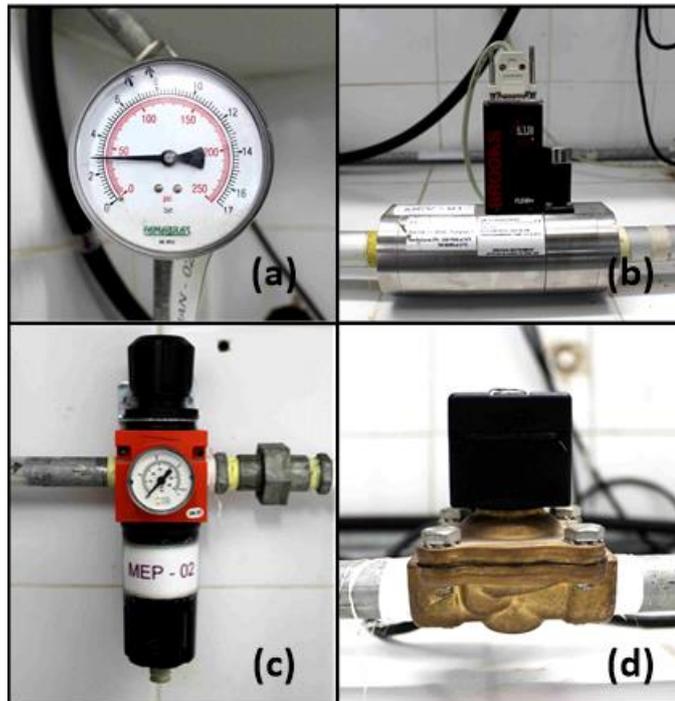


Fonte: Próprio autor.

Na Figura 7 é possível observar como, por exemplo, os sinais analógicos de pressão e atenuação da radiação referente ao escoamento bifásico no *riser* são adquiridos e entram no computador de controle. O sensor de pressão envia sinais contínuos no tempo (analógicos) para um Conversor Analógico Digital – ADC que em seguida segue para memória do CLP e finalmente a informação entra na estação de controle. O Detector ao receber a radiação em seu cristal cintilador (NaI-Tl), gera um sinal analógico em volts onde as tensões mais baixas representam radiação com menor energia e as mais elevadas, radiação de maior energia. Em seguida o sinal do detector entra no Analisador Multicanal – MCA, que interpreta o sinal analógico e gera um espectro discreto da radiação. Após sair MCA o sinal está pronto para entrar na estação de controle e assim como todos os outros parâmetros, ficar disponível para as ações de controle.

Em sequência nas Figuras 8, 9 e 10 estão apresentadas várias fotos dos principais equipamentos e componentes instalados na UPF, acompanhadas de suas descrições.

Figura 8 – Equipamentos da UPF.



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 8 estão apresentados: (a) manômetro de pressão acoplado a linha de ar comprimido antes do desumidificador; (b) controlador e medidor do fluxo de ar fabricado pela Brooks Instruments; (c) regulador de pressão instalado antes de (b); (d) válvula com acionamento por solenoide instalada na linha de ar comprimido com diâmetro $\frac{1}{2}$ polegada;

Figura 9 – Equipamentos da UPF.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 9(e) são mostrados o CLP com seus diversos módulos de entrada/saída de sinais; (f) Sensor de umidade e temperatura com saída de corrente 4-20mA; (g) Sensor de pressão com saída 4-20mA.

Figura 10 – Equipamentos da UPF.



Fonte: Próprio autor.

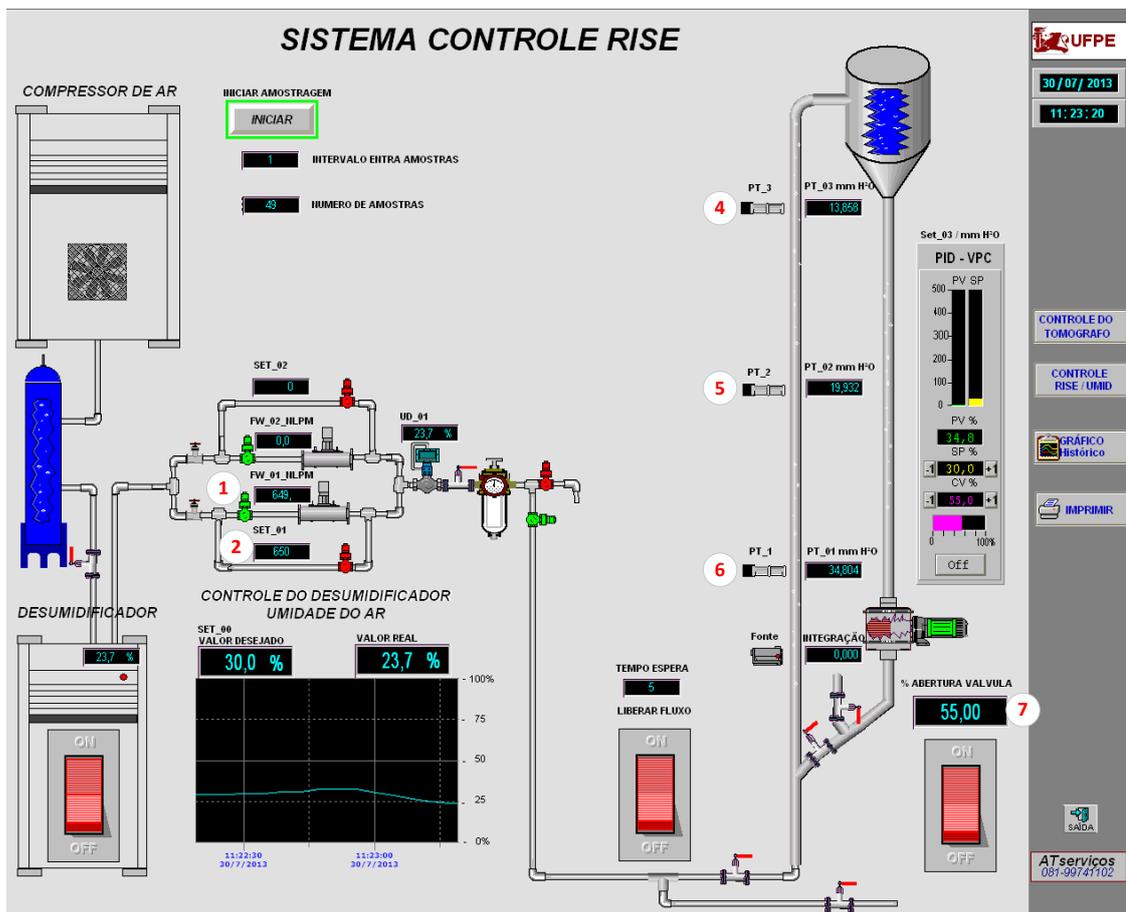
Na Figura 10 estão apresentados: (h) filtro tipo cartucho instalado na saída de ar para reter material particulado que possa sair com o ar; (i) última versão da válvula de controle de

catalisador; (j) desumidificador de ar modelo Schulz SRS 90; (l) Vaso de separação com conjunto de ciclones.

3.1.2 Sistema supervisorio da UPF

Conectada ao CLP uma estação de trabalho é utilizada para operação e aquisição de dados da planta. O sistema supervisorio é o programa desenvolvido exclusivamente para supervisão e operação da UPF. Nesse programa a unidade e seus equipamentos estão esquematicamente representados para facilitar a operação. Na Figura 11 está representada a tela interface de controle do supervisorio.

Figura 11 – Interface de controle do supervisorio.



Fonte: Próprio autor.

Nessa interface de controle o circuito pneumático de alimentação do riser e circuito do ciclo do catalisador estão representados com alguns equipamentos instalados e seus indicadores e controles disponíveis para operação. Por exemplo nos itens 1 e 2 indicados na Figura 11 estão

apresentados o *setpoint* (valor desejado) e o valor real da vazão respectivamente. Nos itens 4, 5 e 6 é possível observar a leitura dos sensores de pressão ao longo do *riser*. No item 7 representa o campo de entrada para valores da abertura da válvula de injeção de sólidos.

3.2 Construção do injetor de sólidos – solicitação e evolução

O controle da taxa de circulação do catalisador em Leito Fluidizado Circulante (LFC) pode ser obtido por meio de uma válvula mecânica localizada entre a coluna de retorno e o *riser*. Como visto anteriormente, as alternativas para o controle da injeção de sólidos podem ser através de válvulas mecânicas ou não mecânicas.

A primeira unidade tipo FCC foi instalada em escala de laboratório e o injetor de sólidos era um parafuso sem fim construído em aço inoxidável. Funcionou satisfatoriamente até que foi detectado o efeito de redução do diâmetro da partícula do catalisador (LIMA et al., 2008), então foi substituído por válvula rotativa.

Na UPF, assim como em qualquer unidade em escala piloto, é essencial que a válvula de controle de sólidos funcione perfeitamente, isto é, apresente elevada confiabilidade e uniformidade durante a operação. Como se trata de um modelo particular construído para experimentos a temperatura ambiente, alguns equipamentos instalados na UPF precisaram ser projetados e construídos pelo próprio grupo de pesquisa.

Várias mudanças foram feitas no dispositivo de controle de sólidos da UPF. Em sua fase inicial de operação, foi utilizado um disposto comercial para controle de sólidos, a válvula rotativa. Com pouco tempo de operação esse equipamento apresentou defeitos devido a sua incompatibilidade com a aplicação e precisou ser substituído. Numa fase posterior a válvula rotativa foi substituída por uma válvula tipo gaveta operada manualmente. Novamente alguns problemas de operação surgiram devido ao contato do pó com a válvula e uma nova alternativa para o controle de catalisador foi pensada.

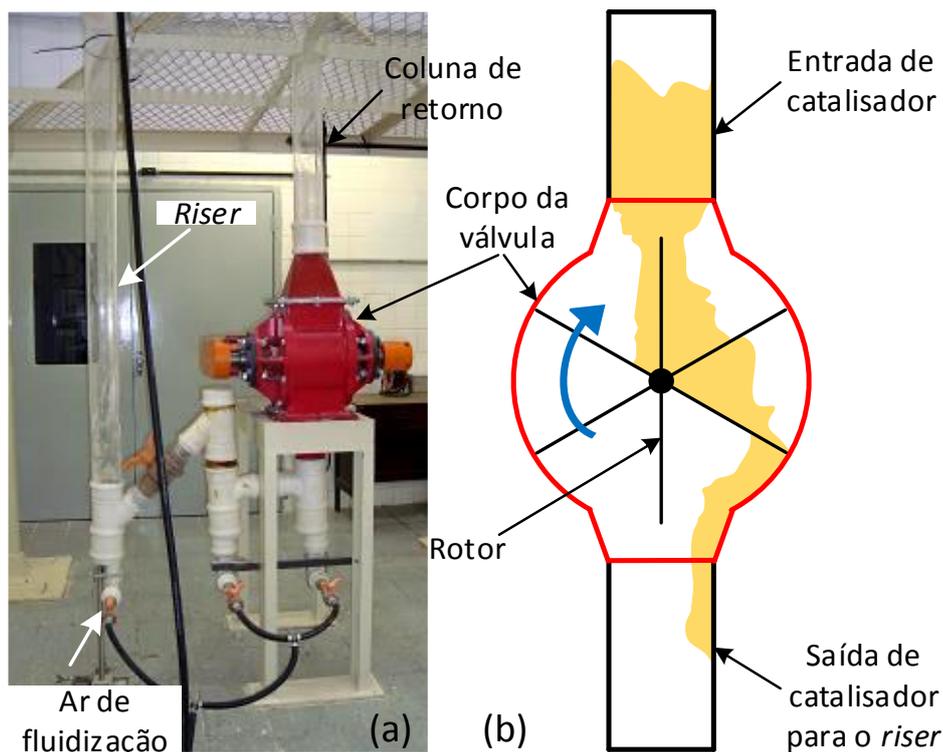
Surgiu então uma solução inovadora, a ideia foi de construir uma válvula que não fosse susceptível aos problemas de contato com as partículas do catalisador. O conceito desta nova válvula consiste em controlar o fluxo no interior de um tubo flexível por meio de um dispositivo aplicado no mesmo. Dessa forma o tubo flexível pode ser fechado ou aberto, externamente, sem que o acionador mecânico entre em contato com o catalisador. Esse dispositivo criado em laboratório recebeu o nome de VPC – *Valve for Pressure Control* (Válvula para o Controle da

Pressão) sigla que faz analogia a mudança de pressão que acontece no leito de fluidizado devido à injeção de sólidos. Atualmente a VPC foi melhorada e está em sua segunda versão.

3.2.1 Válvula rotativa

Inicialmente no controle da injeção de sólidos havia uma válvula rotativa representada esquematicamente na Figura 12. Nesse dispositivo de controle a vazão mássica do catalisador injetado no *riser* depende da velocidade de rotação do rotor (AL-DIN e GUNN, 1983). Esse é um equipamento comercial utilizado para controle de grãos, como milho e soja. Infelizmente após poucas horas de operação a válvula apresentou problemas de vazamentos e travamento do rotor. Isso aconteceu devido à penetração das pequenas partículas do catalisador nas partes móveis internas do eixo de rotação, tornado assim seu uso inviável.

Figura 12 – Válvula rotativa.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 12(a) é possível observar a válvula instalada na UPF e na Figura 12(b) uma representação esquemática de como ocorre o fluxo de material no interior do equipamento. Esse equipamento isola a pressão entre a linha de entrada e saída o que é interessante num sistema de LFC pois evita o contato do material que circula no *riser* com a coluna de retorno.

3.2.2 Válvula tipo gaveta manual

Para substituir a válvula rotativa uma válvula tipo gaveta foi instalada no circuito da UPF. Localizada entre a coluna de retorno e o *riser* esse dispositivo de controle era operado manualmente, a Figura 13 ilustra a válvula instalada no sistema.

Figura 13 – Válvula gaveta instalada na UPF.



Fonte: Próprio autor.

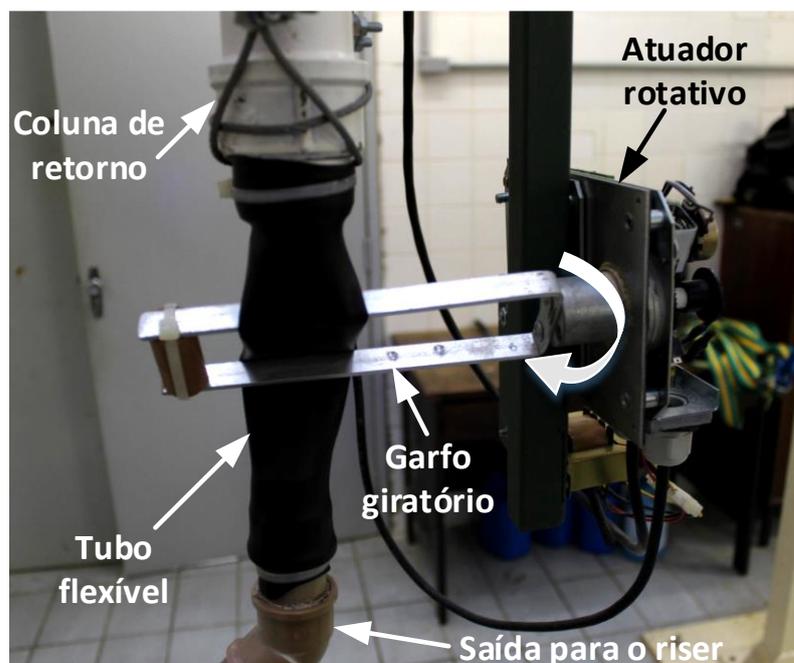
Depois de algumas semanas de operação a válvula gaveta, assim como a válvula rotativa apresentou problemas devido ao contato com o catalisador. Travamentos no eixo de acionamento do obturador aconteceram devido a penetração indevida do catalisador. Alguns vazamentos também ocorreram e numa nova solução precisou ser desenvolvida. Foi então que surgiu o conceito da VPC I.

3.2.3 VPC I

Devido à inviabilidade de operação da válvula rotativa e da válvula gaveta o novo equipamento desenvolvido pelos pesquisadores do grupo de Tomografia Gama e Fluidodinâmica Computacional veio para solucionar o problema de contato com o catalisador.

Esse novo dispositivo de controle de catalisador não possui partes metálicas móveis diretamente em contato com o catalisador, como ocorre nas válvulas anteriormente utilizadas. Nesse equipamento o catalisador escoa no interior de um tubo flexível de borracha cuja abertura é acionada externamente por meio de um garfo, dessa forma abrindo ou fechando a passagem do pó. Está apresentada na Figura 14, a primeira versão da VPC.

Figura 14 – VPC I.



Fonte: Próprio autor.

O garfo giratório em formato de U é rotacionado em torno de seu eixo de simetria acionado por um atuador elétrico ligado ao CLP. Ao girar, o garfo entra em contato com o tubo flexível alterando sua geometria. Inicialmente o tubo foi montado completamente esticado, ou seja, totalmente aberto para a passagem do fluxo, ligando a coluna de retorno à tubulação de ligação com o *riser*. Em seguida o garfo foi posicionado de modo que o tubo ficasse entre as hastes. Depois de instalado, o garfo foi rotacionado em 90° em relação a posição inicial. Com isso a passagem do fluxo de catalisador foi interrompida. Esta foi considerada a posição inicial de operação, pois um grande volume de catalisador fica acumulado na coluna de retorno

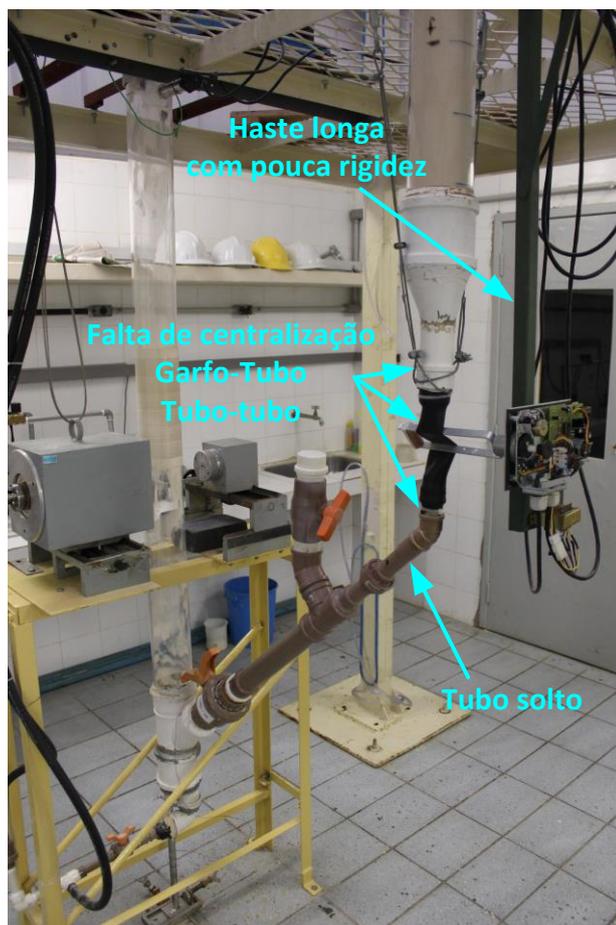
localizada a montante da válvula e apenas deve ser liberado quando necessário. Desta forma, ao girar o garfo a válvula libera o catalisador para o *riser* na quantidade necessária para as condições de operação desejadas.

O atuador proporcional utilizado no acionamento da VPC I é modelo AM- 2001 fabricado pela Cibracon possui um ângulo de trabalho de 90° cuja rotação é proporcional a um sinal analógico de entrada na faixa de 0 a 10 volts em tensão contínua. A alimentação principal desse dispositivo é 24 volts em tensão alternada. Esse atuador possui uma curva linear de rotação em relação a tensão de entrada analógica.

3.2.4 VPC II

A VPC I demonstrou que o conceito da válvula funcionou. O sistema foi montado rapidamente para testar a ideia e acabou sendo utilizado por bastante tempo. No começo o funcionamento da nova válvula parecia satisfatório, não apresentava os problemas das válvulas anteriormente instaladas. Porém a estrutura tanto dos tubos da coluna de retorno, do tubo que liga o *riser* quanto o suporte de própria válvula não estavam suficientemente fixos. Então, quando o atuador rotativo era acionado, não somente o garfo girava, mas toda estrutura modificava de posição. O próprio garfo tinha seu eixo de rotação modificado constantemente cada vez que o atuador entrava em ação. Na Figura 15 é apresentada uma fotografia da VPC I com os problemas de rigidez destacados.

Figura 15 – Problemas identificados na VPC I.

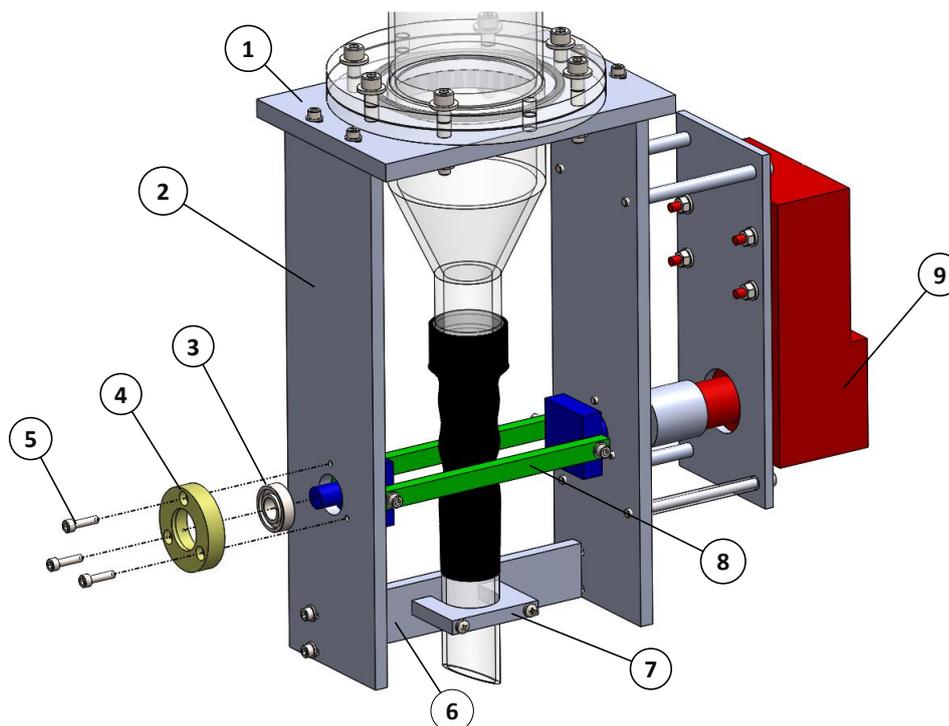


Fonte: Próprio autor.

Depois de observar a Figura 15 é mais fácil de imaginar os problemas ocorridos durante a operação da VPC I. Quando o garfo girava os tubos a montante e a jusante da válvula se moviam. Assim o movimento que deveria ser utilizado apenas para acionar o tubo flexível estava movendo a estrutura como um todo. Resultado, essas perturbações fizeram com que a válvula não funcionasse uniformemente, sem repetitividade e consequentemente reprodutibilidade de operação.

A VPC II surgiu para solucionar os problemas de fixação e aprimorar a operação da UPF. O projeto mecânico da nova versão foi desenvolvido com o auxílio de ferramenta CAD - *Computer Aided Design* (Projeto Auxiliado por Computador) do programa Solidworks. Na Figura 16, está representada a vista semi explodida da VPC II.

Figura 16 – Projeto da VPC II em vista semi explodida.

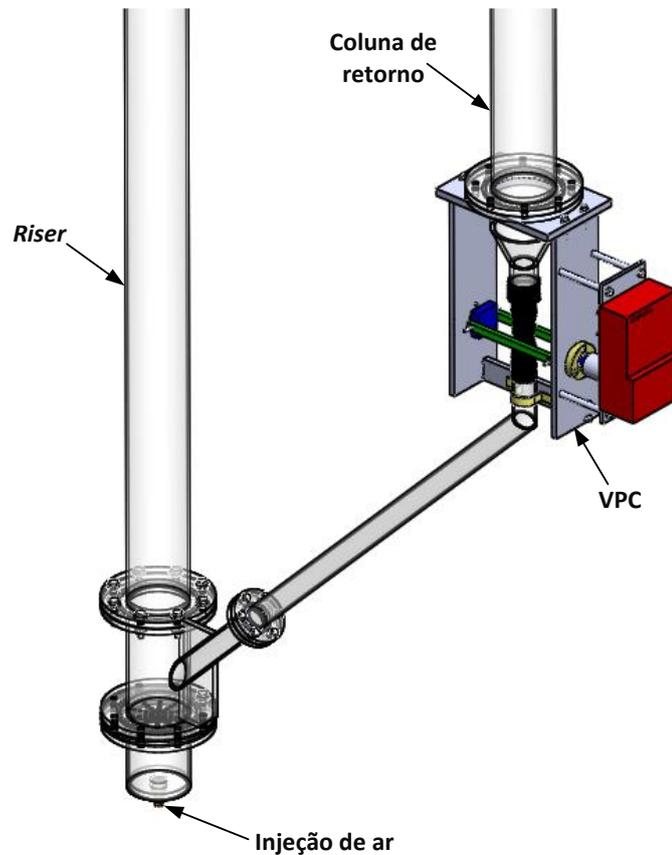


Fonte: Próprio autor.

Os principais componentes da válvula estão enumerados na Figura 16, são eles: (1) Placa de fixação em alumínio, esse componente é responsável por prender a estrutura no flange da coluna de retorno e pela fixação das hastes verticais da VPC II; (2) Haste vertical, serve de base para fixação dos mancais de rolamento do eixo do garfo, fixação do atuador rotativo e fixação da barra inferior; (3) Mancal de rolamento, garante a precisão e suavidade no giro do garfo; (4) Caixa de rolamento para o mancal; (5) Parafuso allen de fixação da caixa de rolamento; (6) Barra inferior, além da função estrutural esse componente serve de base para fixação do tubo que liga a coluna de retorno ao *riser*; (7) Abraçadeira para fixação de saída; (8) haste giratória; (9) Atuador rotativo.

Em resumo o projeto da nova válvula tem por objetivo garantir que toda a estrutura permaneça rígida e que o movimento de giro do garfo libere ou bloqueia a passagem do catalisador. A Figura 17 mostra o modelo geométrico virtual da válvula instalada nas tubulações da UPF.

Figura 17 – Modelo virtual da VPC II instalada na UPF.



Fonte: Próprio autor.

Nesta nova configuração existem apoios em ambos os lados do garfo montados sobre mancais de rolamento o que aumenta a estabilidade, rigidez e diminuí a resistência ao movimento. O garfo também foi centralizado na região da borracha o que garante um comportamento mais uniforme de abertura e fechamento da válvula. O atuador é o mesmo, mas a fixação foi feita no corpo da válvula e não mais por uma haste em balanço como na primeira versão. Essas modificações em conjunto diminuiram as folgas e fizeram com que o movimento do atuador fosse direcionado para acionar o tubo de borracha.

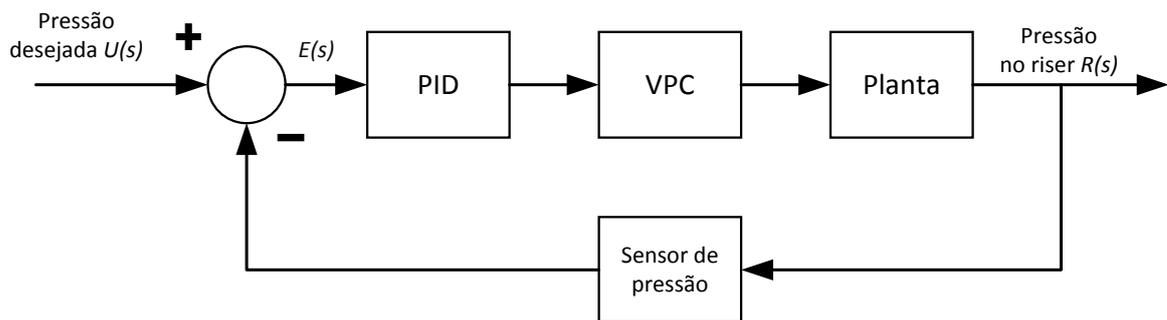
3.3 VPC inserida no sistema de controle do CLP

Em sua primeira versão a VPC I trouxe mais um elemento para o sistema de controle, o atuador rotativo. Como afirmado anteriormente o atuador possui uma curva de rotação proporcional a entrada de tensão variando de 0 a 10 volts. Assim o dispositivo foi ligado a uma saída analógica do CLP e sua operação foi implementada de duas formas: manual ou automática.

No modo de operação manual, a porcentagem de abertura da válvula é definida pelo operador na interface de controle do programa supervisor.

No modo de operação automático, o usuário precisava definir a pressão desejada no primeiro sensor de pressão do *riser*. Na sequência o controlador iniciava a abertura da válvula e mantinha a pressão por meio de um controlador PID. O diagrama de blocos da Figura 18, ilustra a lógica de controle da pressão na UPF.

Figura 18 – Diagrama de blocos para controle da pressão.



Fonte: Próprio Autor.

O PID é um controlador dinâmico, ou seja, a pressão no *riser* é monitorada constantemente pelo CLP e comparada com a pressão desejada. No diagrama de blocos acima, $U(s)$ representa a pressão desejada e $R(s)$ a pressão no *riser*. A diferença entre esses dois valores é o erro $E(s)$ que entra no controlador PID e o mesmo gera um sinal de saída para VPC I afim de diminuir $E(s)$. Na prática o garfo da VPC I gira continuamente hora no sentido horário alternando para o anti-horário, ou seja, aumentando ou restringindo a passagem do fluxo de catalisador.

3.4 Modelagem do injetor de sólidos: Variáveis do processo

A partir de dados experimentais da VPC II e com base nas equações para taxa de circulação de sólidos e queda de pressão em válvulas, apresentadas na Seção 2.3.2, foram testados alguns modelos para VPC II. Vazão de ar, densidade do catalisador, variações de pressão, fração volumétrica de sólidos/vazio, são alguns dos dados de entrada para os modelos matemáticos. Alguns desses dados são constantes, como a densidade do catalisador, mas outros precisam ser medidos durante a operação da planta como a pressão e fração volumétrica de sólidos.

Instrumentação é uma importante questão na engenharia de fluidização, particularmente por causa do fluxo multifásico, dinâmico e da natureza não linear do leito fluidizado (HORIO, 2003). Em unidades de pesquisas a instrumentação requerida deve ser diferente quando comparada a uma instalação comercial, no nosso caso, o objetivo é conseguir o máximo de informações para um projeto de *scale-up* seguro.

3.4.1 Medidas de pressão

Entre todos os sensores e sondas, os sensores de pressão podem fornecer as informações mais básicas não apenas a pressão, mas também vazios, altura da coluna, regime de escoamento e qualidade da fluidização (HORIO et al., 2003). No circuito da UPF existem alguns sensores de pressão na linha de ar comprimido principal quanto no leito fluidizado onde circula o catalisador.

Nas linhas de ar comprimido estão instalados manômetros analógicos. Esses sensores, ver Figura 4(a), são utilizados para verificação de possíveis mudanças de pressão na linha ocasionada por defeitos no sistema. Esses instrumentos não estão ligados ao CLP e a leitura da pressão é feita diretamente no visor do instrumento. Em resumo os manômetros são essenciais para verificação do circuito pneumático que alimenta o leito fluidizado circulante.

No *riser* estão instalados três sensores eletrônicos para medir a pressão ao longo de seu comprimento. O primeiro sensor está localizado a 1,79 m, o segundo a 3,84 m e o terceiro a 5,70 m em relação a entrada de ar no *riser*. A faixa de operação desses sensores é de 0 a 100 mbar. Eles estão ligados ao CLP através de um sinal elétrico de corrente, pois durante seu funcionamento o sensor gera um sinal de saída de na faixa de 4 -20 mA proporcional a pressão em sua célula de carga. Na Figura 9(g) é mostrado um sensor de pressão instalado no *riser*. As

informações desses sensores podem ser visualizadas diretamente no programa supervisor e são armazenadas para serem utilizadas no estudo dos modelos fluidodinâmicos.

3.4.2 Técnica do gradiente de pressão

Industrialmente, uma técnica para determinar a concentração média de sólidos entre dois pontos numa tubulação vertical, consiste em medir a diferença de pressão no *riser*, ΔP , entre dois pontos separados por uma distância ΔL (LUCKOS e HOED, 2005). Os problemas para esse tipo de medição é que os sensores de pressão são inseridos dentro do *riser*, por tanto, esta é uma técnica invasiva, onde há perturbação no sistema, ou seja, do escoamento bifásico gás – sólido, no interior do *riser*. Além de que a fração volumétrica medida é uma média entre dois medidores de pressão. A fração volumétrica média de sólido, $\hat{\varepsilon}_s$, é determinada a partir da medida do diferencial de pressão ΔP entre dois pontos do escoamento distantes ΔL expressa pela Equação (7):

$$\hat{\varepsilon}_s = \frac{c}{(\rho_s - \rho)g} \left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right) \quad (7)$$

em que c é a constante de conversão ($c = 9,80 \text{ Pa/mmH}_2\text{O}$), ρ_s e ρ são as massas específicas da partícula (catalisador) e do gás (ar) [kg/m^3], ΔP é queda de pressão medida nas seções testes ao longo do *riser* [mmH_2O], e ΔL é a distância entre as seções teste [m].

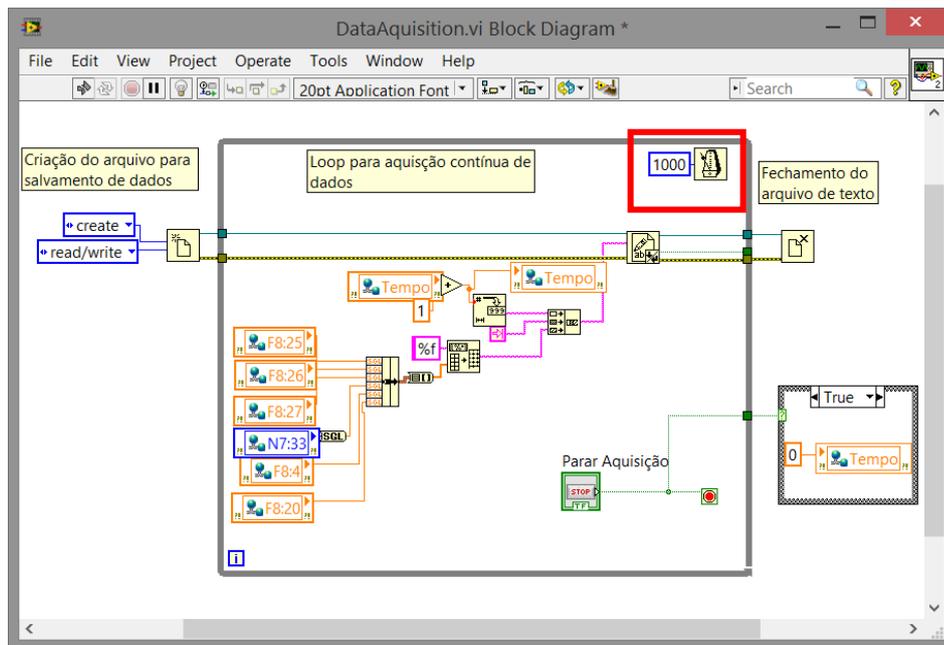
A utilização da Equação (7) é a técnica mais simples de ser aplicada e, por isso mesmo, é a mais restrita. Essa equação é aplicada somente a escoamentos verticais em leito fluidizado com gases a baixas pressões, o peso de gás no leito será desprezível se comparado ao peso de sólido.

3.4.3 Implementação do LabVIEW para aquisição de dados

A aquisição dos dados de pressão descritos no tópico anterior como também as variáveis envolvidas na operação da UPF são de fundamental importância para o desenvolvimento e teste de modelos.

No sistema de controle da UPF os dados de vazão e umidade do ar, pressões no *riser*, abertura da válvula estão disponíveis na memória do CLP. Com auxílio da interface OPC, descrita na Seção 2.4.2, o programa criado no LabVIEW foi utilizado para leitura e salvamento dos dados do CLP. Esta exibido na Figura 19, o diagrama de blocos do instrumento virtual criado para aquisição de dados.

Figura 19 – Diagrama de blocos do LabVIEW para aquisição de dados.



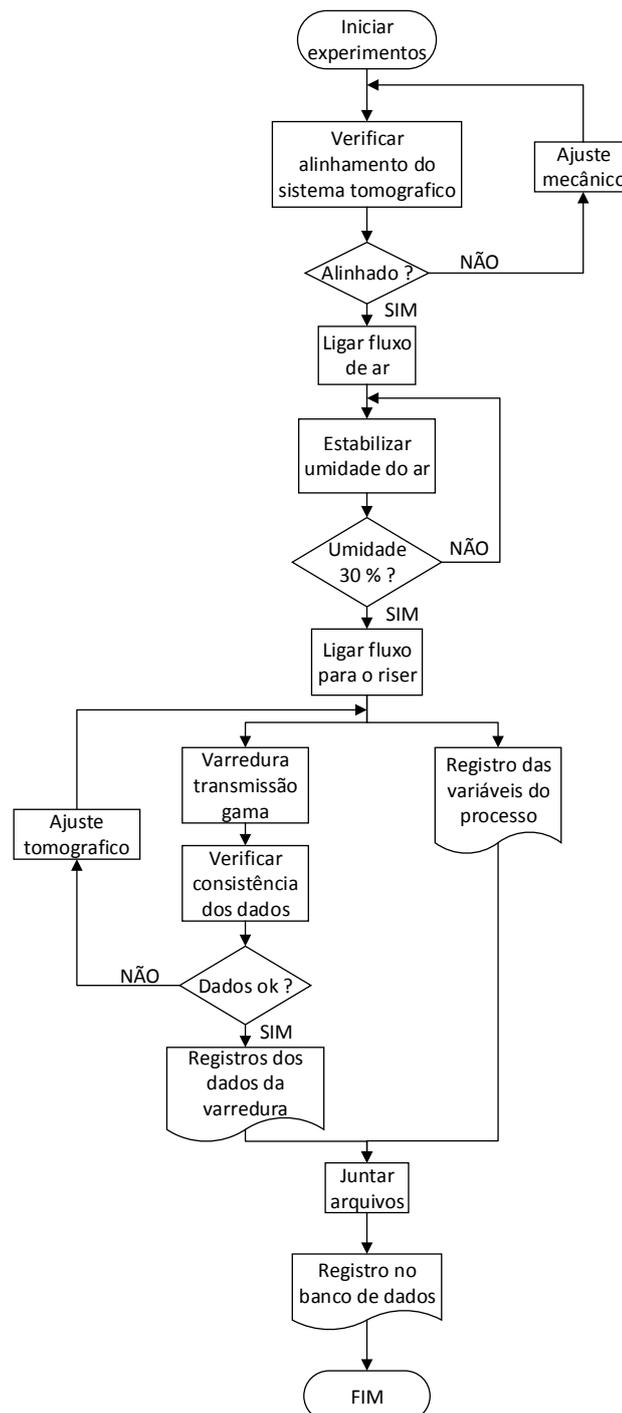
Fonte: Próprio autor.

No digrama de blocos do VI o fluxo de dados segue a sequência de criação do arquivo, escrita das variáveis do processo e fechamento do arquivo. O intervalo de aquisição de dados está definido em 1 segundo como indicado no quadro vermelho na Figura 19. Dessa forma em intervalos regulares de 1 segundo as variáveis de interesse são escritas em um arquivo de texto. Quando a operação de aquisição é iniciada o programa solicita o nome e o local onde o arquivo que será criado deve ser salvo. Depois de iniciada a aquisição, o processo ocorre até que o usuário solicite o fim da aquisição.

3.4.4 Experimentos e sistema de aquisição de dados

Antes de realizar um experimento é preciso verificar se tudo está certo para que os dados registrados sejam confiáveis. Então quando um experimento é iniciado na UPF, ocorre um processo de verificação automática, como mostrado no fluxograma da Figura 20.

Figura 20 - Fluxograma de operação e aquisição de dados na UPF.



Fonte: Próprio autor.

As operações de processo do fluxograma da Figura 20 estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Processos realizados para realizados de experimentos na UPF.

Processo	Descrição
Verificar alinhamento do sistema tomografico	Checar se os três sistemas automatizados de perfilagem gama estão varrendo o mesmo intervalo do tubo
Ajuste mecânico	Alinhamento do sistema movendo as mesas coordenadas para posição adequada
Ligar fluxo de ar	Liberar o fluxo de ar para etapa de controle de umidade
Estabilizar umidade do ar	Ligar o desumidificador para remover o vapor de água do ar de fluidização. Enquanto a umidade não for controlada o ar é jogado para fora do sistema
Ligar fluxo de ar para o riser	Automaticamente o sistema comuta algumas válvulas abertas e direciona o ar para o distribuidor de ar na entrada do riser
Varredura transmissão gama	Inicia as medidas de transmissão gama ao longo do riser
Verificar consistência dos dados	Verificar se a quantidade de pontos adquiridos está correta. Verificar se as mesas não desalinham durante os experimentos
Ajuste tomográfico	Ajustar os erros do sistema tomográfico para realização de uma nova aquisição de dados
Juntar arquivos	Juntar os arquivos da varredura gama com as variáveis do processo (pressão, vazão de ar, abertura da VPC, umidade do ar) em um único arquivo para registro do experimento no banco de dados

Fonte: Próprio autor.

Seguindo esses procedimentos antes de realizar um experimento é possível não apenas garantir a confiabilidade, mas também a facilidade de acesso dos dados para análise e aplicação dos modelos matemáticos. Esses procedimentos descritos na Tabela 2, estão implementados no programa do LabVIEW em conjunto com o MATLAB.

3.4.5 Fração volumétrica de sólidos medida por transmissão gama

A medida do sinal emitido por uma fonte radioativa é a técnica mais competitiva para caracterização do escoamento multifásico em um reator opaco (DUDUKOVIC, 2003). Uma importante aplicação industrial da técnica de atenuação de raios gama é a medição da fração volumétrica de sólidos. A escolha da transmissão gama, para este estudo é devido a mesma ser uma técnica não invasiva, fonte e detector não tem contato com o fluxo.

Esta técnica não invasiva consiste na medição da atenuação de raios gama após serem emitidos pela fonte e passarem através de um escoamento bifásico gás – sólido no interior do *riser* da UPF. O uso da técnica de atenuação de radiação gama permite a obtenção da fração volumétrica da fase sólida, através da equação de Beer – Lambert (WIRTH et al., 1991), expressa pela Equação (8):

$$\varepsilon_s = \frac{1}{\mu \rho_s L_c} \ln \left(\frac{I_V}{I_F} \right) \quad (8)$$

em que μ é o coeficiente de atenuação de massa [m^2/kg], ρ_s é a massa específica do catalisador [kg/cm^3], e I_V e I_F são as intensidades gama com tubo vazio e em condições de fluxo. E L_c é o comprimento da trajetória do feixe gama dentro do tubo.

Considerando que L_c está situado sobre a trajetória fonte-detector do feixe gama, o efeito da espessura da parede do tubo d foi avaliada pela Equação (9), (DANTAS et al., 2006):

$$d = 2(\sqrt{R_e^2 - x_i^2} - \sqrt{R_i^2 - x_i^2}) \quad (9)$$

onde R_e e R_i são o raio externo e interno, respectivamente, x_i o intervalo da varredura e foi assumindo um *riser* simétrico. A atenuação da radiação na parede do tubo foi equacionada:

$$y = ae^{bd} \quad (10)$$

A atenuação exponencial com da Equação (10), os parâmetros a e b foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados não linear.

Integrando a Equação (8), chega-se a fração volumétrica média de sólido (catalisador) na seção teste em estudo (Equação 11):

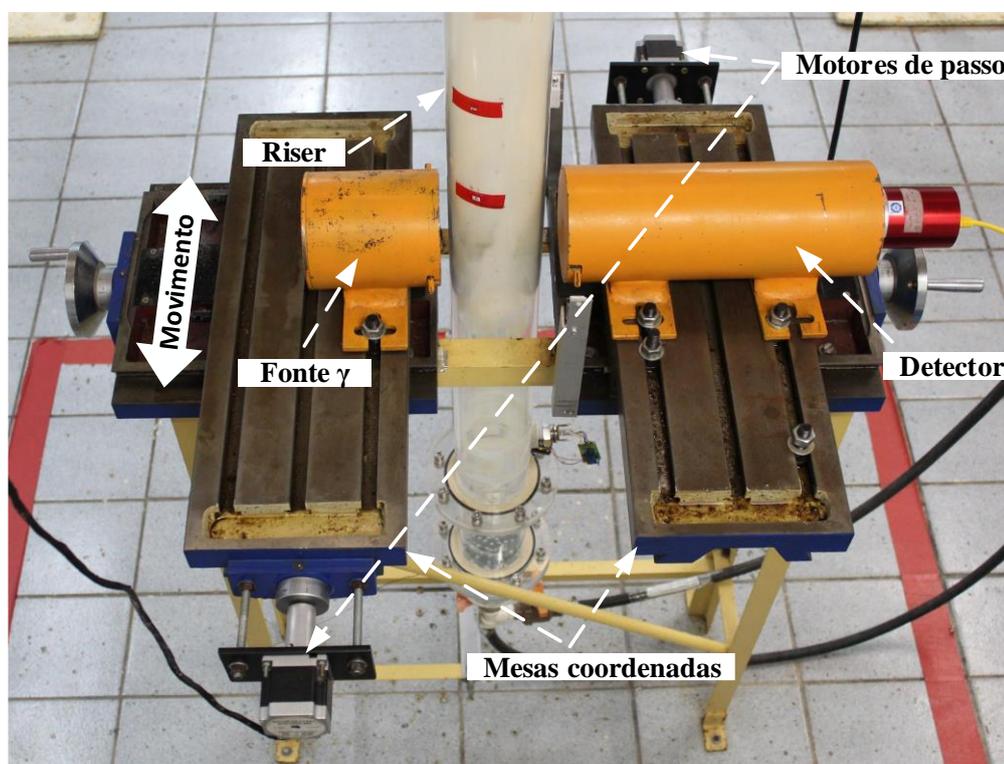
$$\bar{\varepsilon}_s = \frac{4}{\pi D^2} \int_{-r}^r \varepsilon_s(r) r dr \quad (11)$$

no qual D é o diâmetro interno do *riser* da UPF [m].

3.4.5.1 Sistema automatizado para medidas de transmissão gama

Nas instalações da UPF existem três equipamentos automáticos para perfilagem gama instalados ao longo do *riser*. Os dados adquiridos por meio desses equipamentos fornecem informações para determinação da distribuição radial de catalisador na seção transversal do *riser*. Esse equipamento realiza uma varredura na seção transversal do tubo automaticamente e salva os dados em um arquivo de texto. Na Figura 21 mostra uma foto do sistema tomográfico instalado na UPF.

Figura 21 – Sistema automático de perfilagem gama.



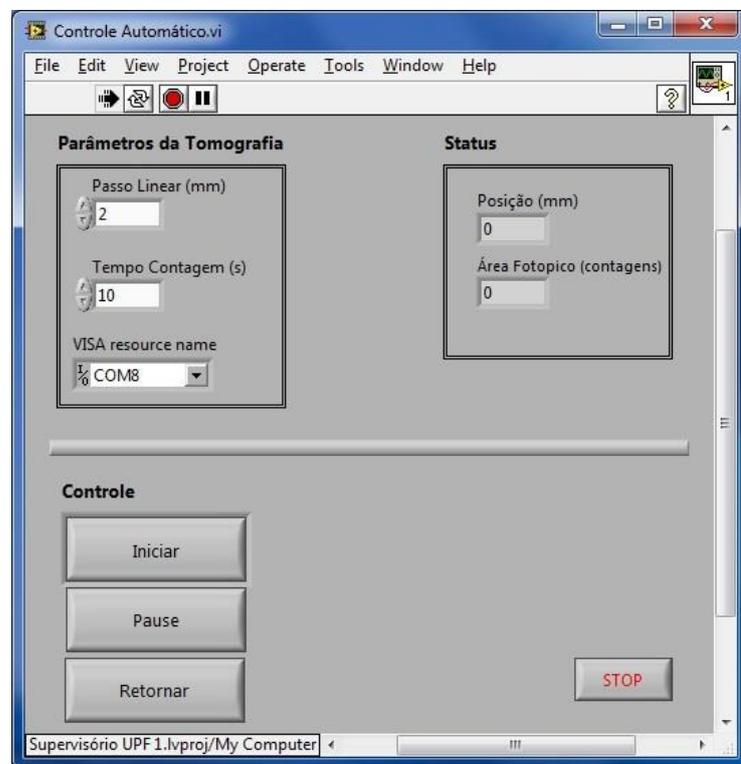
Fonte: Próprio autor.

Na Figura 21 é possível observar dois motores de passos que acionam as mesas coordenadas. Essas mesas possuem resolução linear de 0,04 mm em seu eixo deslocamento transversal. Montadas sob as mesas estão a fonte de radiação gama a esquerda e o detector de radiação a direita. Durante uma varredura os motores de passo são acionados concomitantemente e a fonte translada ao longo da seção do *riser* em intervalo de passos programadas medindo a atenuação dos fótons em cada ponto. A fonte utilizada foi a ^{241}Am e o sistema de detecção é composto por um cristal cintilador de NaI(Tl) acoplado diretamente a uma fotomultiplicadora que está ligada ao Analisador Multicanal – MCA modelo Osprey

fabricado pela Canberra Inc. A partir do MCA os dados são enviados para o computador onde o usuário pode observar todo o espectro da radiação e controlar o equipamento.

O programa de controle do sistema tomográfico foi desenvolvido no LabVIEW. O Instrumento Virtual (VI) criado interage com o sistema de detecção e movimento da unidade de perfilagem gama. O algoritmo de controle é baseado numa máquina de estados aciona o sistema de detecção em seguida o sistema de translado das mesas, seguindo numa sequência de movimento e contagem até o final da varredura. A tela o instrumento virtual de controle está ilustrado na Figura 22.

Figura 22 – Instrumento virtual de controle do sistema de perfilagem gama.



Fonte: Próprio autor.

Na interface do VI as configurações da varredura são inseridas. No campo parâmetros da tomografia são definidos o passo linear, tempo de contagem para o intervalo de medidas e qual dos três sistemas tomográfico vai ser acionado. No quadro Status é exibida a posição atual do sistema em relação a origem como também a última contagem da radiação. Uma vez definida as condições do experimento, o sistema faz a varredura completa da seção do *riser* e retorna com um arquivo contendo todos os dados de contagens.

3.5 Operação e precisão requerida na UPF

Nas medidas realizadas com o leito fluidizado em circulação a estabilidade do sistema é requerida para a precisão e a reprodutibilidade dos dados. Em condições de controle estabilizado as oscilações transitórias e decorrentes de aumento do transporte de sólidos em fase densa são fonte de incerteza nas medidas. Em se tratando de operações envolvendo escoamentos na UPF, quanto mais precisos forem os dados obtidos mais confiável será o processo de *scale-up* para escala industrial.

Na UPF os sensores de pressão possuem precisão de sinal de 0,1%. O sistema de controle e medida da vazão de ar possui uma precisão de 0,7%. Estas informações estão disponíveis em manuais dos fabricantes e são facilmente verificadas por meio de medidas. Porém como se pode avaliar oscilações na quantidade de catalisador inserida no sistema? Uma das formas foi medir a altura de catalisador na coluna de retorno. Notou-se que a altura do nível de catalisador oscilava e diminuía com a operação da UPF. As causas desta oscilação eram alguns vazamentos no sistema, saída do catalisador pelo conjunto de ciclones e por fim foi detectado um acúmulo de sólidos na região horizontal após a conexão do joelho 90° de saída do *riser* como mostrado na Figura 23.

Figura 23 - Ponto de acúmulo de catalisador na saída do *riser*.



(a)



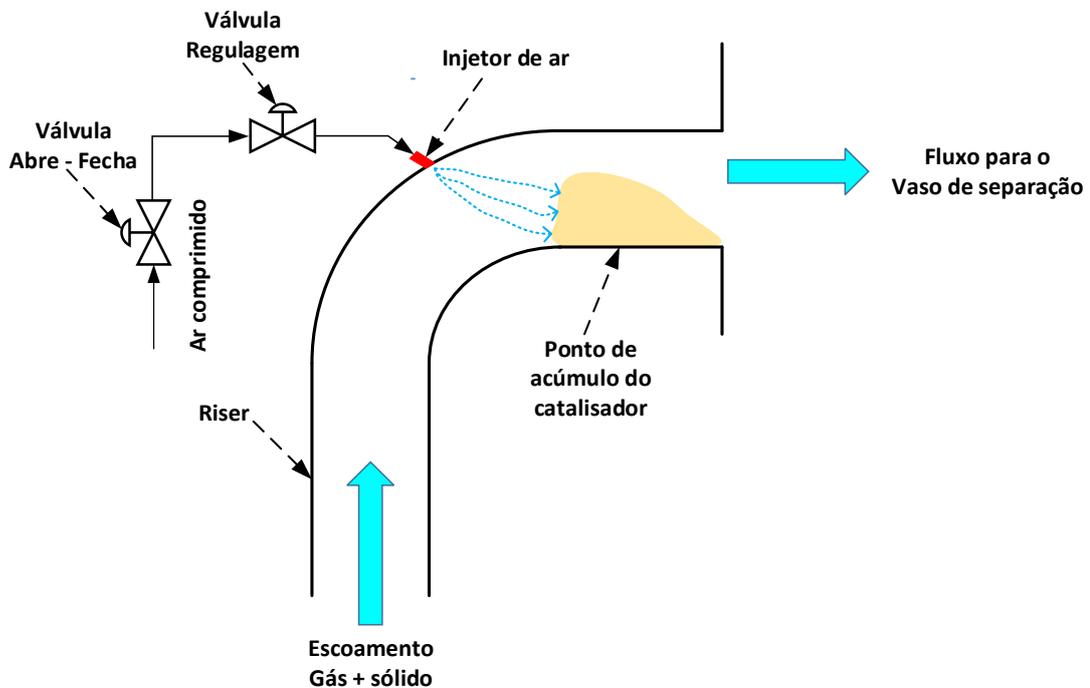
(b)

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 23 (a) está ilustrada a curva de saída que liga o *riser* ao vaso de separação cujo ponto de acúmulo de catalisador está no tubo perpendicular ao *riser*. A Figura 23 (b) mostra o catalisador acumulado na tubulação.

Para melhorar a precisão do controle do catalisador no sistema os vazamentos foram sanados. Foi modificada a posição do filtro na saída do vaso de separação, que contém o conjunto de ciclones para evitar emissão do catalisador para o meio ambiente. O filtro foi colocado acima do vaso de separação na vertical, como já foi visto na Figura 6, uma vez que anteriormente o mesmo estava numa posição horizontal acusando assim estagnação do catalisador. Durante a operação da UPF, ocorreu acúmulo do catalisador, como pode ser observada na Figura 23 (b), que mostra o joelho visto através do vaso de separação. Essa foto registra um ponto de estagnação na região horizontal próxima a conexão com o Joelho de 90°, que não é transparente, não permitindo visualizar o escoamento. Para colocar essa massa estagnada em circulação, e ter o inventário do sob controle, foi planejado e instalado um injetor de ar comprimido na saída do *riser*, na curva do joelho. Esse injetor idealizado e testado é uma solução nova e de grande interesse em aplicações industriais. Uma representação esquemática do injetor de ar instalado na saída do *riser* está ilustrada na Figura 24.

Figura 24 – Esquema de instalação do injetor de ar no joelho de saída do *riser*.



Fonte: Próprio autor.

Depois de instalado o injetor alguns testes foram realizados para determinar sua influência no escoamento. Na linha de alimentação do injetor existem duas válvulas, uma para regulagem e outra para abrir e fechar a passagem do fluxo de ar para o injetor (Figura 24). Depois de ajustada a abertura ideal da válvula de regulagem para remover o catalisador, a válvula de abre e fecha foi utilizada para os testes com e sem injetor.

3.6 Planejamento experimental com Injetor de ar e VPC II

O planejamento dos experimentos que serão realizados na UPF, tanto para o texto do injetor de ar colocado da curva de saída do *riser* quanto da VPC II, são muito importantes para sistematizar a análise dos dados. Na Seções 3.6.1 está descrito o procedimento experimental para avaliação do injetor e na Seção 3.6.2 está descrito o procedimento do experimento para a VPC II.

3.6.1 Influência do injetor de ar no perfil de pressão do *riser*.

Adicionar o injetor de ar no Joelho de saída do *riser* foi a solução encontrada para eliminar o acúmulo de catalisador na tubulação. Como nenhum pó ficou retido no sistema foi obtida uma maior precisão na determinação da quantidade de catalisador circulando. Porém os efeitos adicionais desta modificação não eram conhecidos, não se sabia o que aconteceria com o escoamento na UPF. Para avaliar essa influência foram realizadas medidas de pressão no *riser* em diferentes vazões de ar, com e sem o injetor, os experimentos estão esquematizados na Tabela 3.

Tabela 3 – Experimentos para determinar a influência do injetor.

Condição de Operação	Teste
Vazões de ar, Q (L/min): 500, 500, 600, 650 e 700.	Com injetor
Pressão medida em três pontos ao longo do <i>riser</i>	Sem injetor

Fonte: Próprio autor.

3.6.2 Testes com a VPC II

Para testar a nova válvula desenvolvida e determinar o seu comportamento no sistema fluidodinâmico da UPF alguns experimentos foram realizados. Nesses experimentos foi analisada a influência da abertura da válvula no escoamento gás-sólido no interior do *riser*. Como variáveis de entrada foram definidas a vazão do ar e a abertura da VPC II. Como variáveis de respostas foram analisadas a pressão e a fração volumétrica de sólidos em três pontos ao longo do *riser* como também a variação da massa de catalisador na coluna de retorno. O perfil de pressão obtido com os três medidores ao longo do *riser* foi comparado com fração volumétrica de sólidos medida com transmissão gama.

Os experimentos foram realizados para diferentes vazões de ar na entrada do *riser* com diferentes aberturas da VPC II. Para cada abertura, após o sistema entrar em equilíbrio, foram realizadas as medidas de transmissão gama. Assim para uma dada vazão de ar, várias aberturas da VPC II, em ordem crescente, foram ajustadas e para cada abertura a pressão e a fração volumétrica de sólidos com radiação gama foram medidos. Nesse caso, a série de experimentos realizados estão sumarizados na Tabela 4:

Tabela 4 – Planejamento experimental VPC II.

Condição de Operação	Medidas
Vazões de ar, Q (L/min): 500, 500, 600, 650 e 700.	Perfil de pressão
Pressão medida em três pontos ao longo do <i>riser</i>	Perfil gama

Fonte: Próprio autor.

Os experimentos foram realizados para diferentes vazões de ar na entrada do *riser* com diferentes aberturas da VPC II. Para cada abertura, após o sistema entrar em equilíbrio, foram realizadas as medidas de transmissão gama. Assim para uma dada vazão de ar, várias aberturas da VPC II, em ordem crescente, foram ajustadas e realizadas medidas para cada uma as pressões e os perfil de fração volumétrica de sólidos com radiação gama.

3.6.3 Determinação do ponto de colapso em um leito fluidizado circulante

Os pontos de colapso em um leito fluidizado circulante estabelecem limites para a operação adequada do sistema. Os pontos de colapso da mistura gás-sólido podem ser calculados, levantando a curva de velocidade de “choking” em função da velocidade mássica de sólidos, juntamente com a estimativa da velocidade de partícula em função da velocidade mássica de sólidos.

A condição de *choking* estabelece o limite de velocidade da fase fluida (gasosa), U_g , para que ocorra o transporte pneumático ascendente da fase particulada (sólido) sem que ocorra a circulação dessa fase.

Segundo Santana (1996), a velocidade nas condições de *choking* é uma situação em que ocorre quando a velocidade do fluido alcança um valor crítico em que as partículas passam a se mover no sentido descendente no interior do *riser* da UPF. Ou seja, tem início com uma circulação interna das partículas, em que estas ascendem no centro do reator tipo *riser* e descem nas regiões próximas à sua parede. Além disso, o *choking* está intimamente associado à formação de *cluster*.

A obtenção das condições seguras de operação em leitos circulantes baseados na previsão do colapso da mistura gás-sólido, levantando a curva de velocidade de *choking* em função da velocidade mássica de sólidos, juntamente com a estimativa da velocidade da partícula em função da velocidade mássica de sólidos.

A curva de velocidade de *choking* para o *riser* é definida por:

$$\frac{v_{ch}}{\sqrt{gd_p}} = 9,07 \left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{0,347} \left(\frac{wd_p}{\mu} \right)^{0,214} \left(\frac{d_p}{D_T} \right)^{0,246} \quad (12)$$

em que ρ é a massa específica da partícula (p) ou do gás (g), kg/m^3 ; μ é viscosidade absoluta do gás, $Pa.s$; d_p é o diâmetro da partícula, m ; g é aceleração da gravidade, m/s^2 ; D_T é o diâmetro interno do *riser*, m ; e w é o fluxo mássico de partícula no *riser*, $kg/m^2.s$ (WILSON, 1997 e NASCIMENTO et al., 2009).

Wilson (1997) propôs uma correlação para determinar a velocidade da partícula, baseado-se em dados experimentais em transporte em leito fluidizado circulante submetido a várias condições de operação. A forma funcional da velocidade da partícula é:

$$v_p = \sqrt[3]{(v_g - v_{ch})v_g^2} \quad (13)$$

em que v_p e v_{ch} são as velocidade das partículas (p) e *choking* (ch), respectivamente.

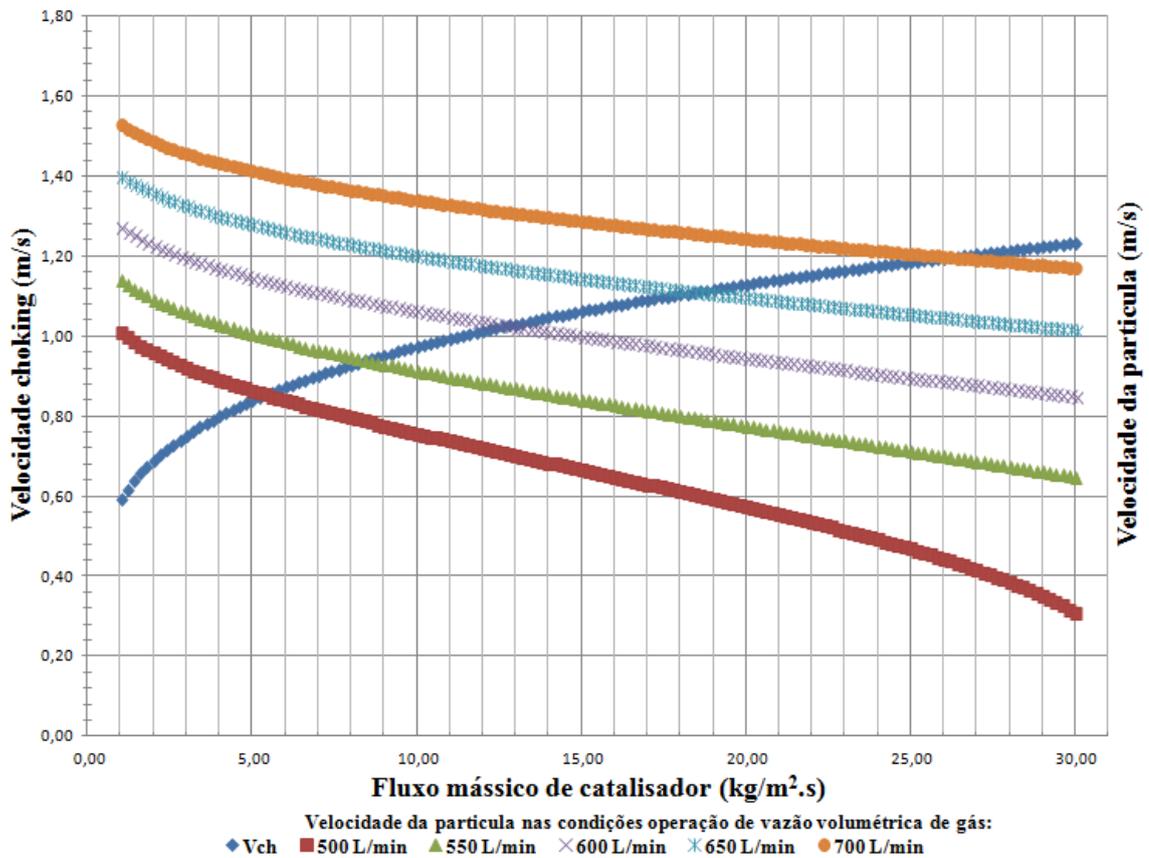
Utilizando os dados da Tabela 5 e as Equações (12) e (13) para obter os perfis das velocidades de *choking* e da partícula em função do fluxo mássico de catalisador no *riser* da UPF, ver Figura 25.

Tabela 5 – Parâmetros geométrico e físico-químicos da UPF.

Aspectos		Propriedades					
Geométricos		da partícula				do fluido	
$D_T(mm)$	$H(m)$	Grupos Geldart	Tipo	$d_p(\mu m)$	$\rho_p(kg/m^3)$	$\mu(Pa.s)$	$\rho_g(kg/m^3)$
92	6	A	FCC	72	1200	0,00002	1,293

Fonte: Próprio autor.

Figura 25 - Perfis de velocidade das fases para diversas condições de operação da UPF.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 25, há um ponto de interseção entre as curvas das velocidades *choking* e da partícula, definido como sendo o ponto de colapso da mistura gás – sólido. Ou seja, o ponto onde a vazão volumétrica de gás (Q_g) não é mais suficiente para arrastar a fase particulada. A importância da estimativa desse ponto está associada à determinação das variáveis de operação do leito circulante, pois, a estimativa desse ponto leva ao conhecimento prévio, embora de caráter aproximado, da quantidade de catalisador possível de ser arrastada para determinada condição de operação.

No ponto de colapso da mistura gás – sólido, têm-se a seguinte condição:

$$v_p = v_{ch} \quad (14)$$

em que v_p e v_{ch} são as velocidade das partículas (p) e *choking* (ch), respectivamente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 A VPC II configurada no controle da UPF

Identificados os problemas ocorridos com a primeira versão da válvula de controle, a VPC I, melhorias foram sugeridas e uma nova válvula foi projetada, construída e instalada, como mostrado na Figura 26.

Figura 26 – Válvula VPC II instalada na UPF.



Fonte: Próprio autor.

A posição da nova válvula é exatamente a mesma das anteriores. Adicionalmente as tubulações de entrada e saída da VPC que antes eram de PVC foram substituídas por tubos de acrílico para melhor visualização do escoamento.

O atuador rotativo da válvula é o mesmo da VPC I e está ligado a saída analógica do CLP. A VPC II se apresentou mais robusta e estável, não sendo mais verificados os problemas de vibração e movimentos de toda estrutura durante o acionamento do atuador. Assim o movimento de giro no garfo foi totalmente direcionado para acionar o tubo de borracha. Essas melhorias funcionais resultaram no melhor controle da injeção de sólidos e consequentemente menores oscilações da pressão no *riser*.

O algoritmo PID anteriormente definido, Seção 3.3, para VPC I não apresentou bons resultado para o ajuste da pressão na VPC II. Oscilações muito elevadas na pressão foram observadas com o uso do controlador dinâmico. Isso reflete a diferença do entre o funcionamento das duas válvulas. A VPC I precisou de um controle dinâmico para conseguir

manter uma pressão estável no inteiro do *riser*. Apesar de que esse controle dinâmico funcionou bem por pouco tempo, depois a ajuste da pressão de mostrou instável, provavelmente devido ao problema de instabilidade da estrutura. Porém com a VPC II não foi necessário um algoritmo de controle dinâmico para estabilizar a pressão no *riser*, pois para uma dada abertura a pressão se manteve em intervalos de oscilação constantes. Esse fato foi verificado durante os experimentos de teste da válvula. Certamente um controle dinâmico ajudaria a manter o sistema em equilíbrio em caso de interferências externas, por exemplo, ou diminuiria o tempo de estabilização da pressão no *riser*. Mas é certo que o funcionamento da VPC II é uniforme e não necessariamente precisa de um controle dinâmico para estabilização da pressão no *riser*.

A configuração da válvula rotativa no controle é automática e a taxa de injeção de sólidos é fornecida pela rotação do motor. A VPCII é acionada pela aceleração da gravidade atuando na massa de catalisador na coluna de retorno, com a abertura, o catalisador passa diretamente para o *riser*. A configuração no sistema de controle precisa ser definida e a VPC II, requer medida indireta para determinar a taxa de sólidos injetada.

Na comparação entre a VPCII e a válvula rotativa, é preciso considerar que esta injeta uma massa de sólidos fixa a cada período determinado pela rotação do motor; essa injeção discreta causa pulso no fluxo no *riser*. Esse pulso é indesejável se queremos uma distribuição uniforme de sólidos e é ainda causa de oscilações e de instabilidade nas condições de operação. Ao contrário, a VPCII injeta sólidos de modo contínuo, a massa de catalisador entra no *riser* sem causar nenhuma perturbação à distribuição do fluxo ascendente. A VPC II não apresentou os defeitos ocorridos com as válvulas anteriores.

Na sequência de testes, as novas tubulações em acrílico entre a coluna de retorno e o *riser* ajudaram a observar o que acontece quando o sistema de fluidização não tem mais capacidade para transportar todo o catalisador direcionado para o *riser*, ocorrendo o colapso.

4.2 Testes da influência do injetor no *riser*

O injetor de ar, como mostrado esquematicamente na Figura 24, foi construído e instalado na curva de saída do que liga o *riser* ao vaso de separação (ver Figura 23 (a)). Ele consiste num bico, em alumínio, com abertura de 5 mm que foi preso por uma rosca na parede da curva, como mostrado na Figura 27.

Figura 27 - Injetor instalado na curva de saída do riser.



Fonte: Próprio autor.

A introdução do injetor possibilitou a remoção do catalisador acumulado na região de saída do *riser*, como se pode ser observado na Figura 28(a).

Figura 28 – Catalisador na região de saída do riser.



(a) Sem a injeção de ar



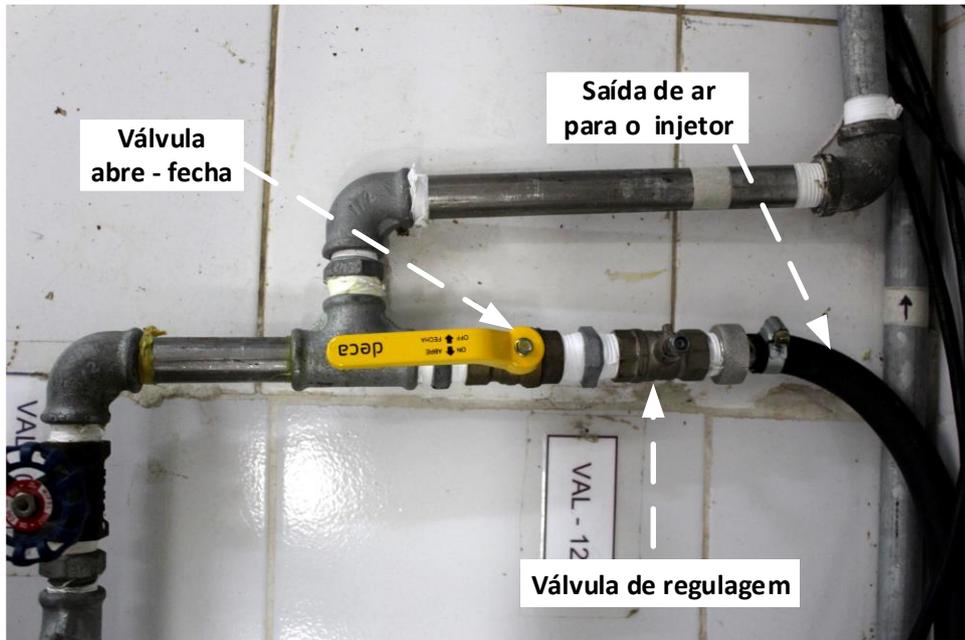
(b) Com a injeção de ar

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 28(a) pode-se observar o catalisador acumulado na região de saída do *riser*, e na Figura 28(b) pode-se observar que o catalisador foi removido, devido a injeção de ar. A

regulagem da quantidade de ar injetado na curva do joelho foi feita utilizando duas válvulas ligadas em série, como mostradas no esquema da Figura 24 e instaladas na Figura 29.

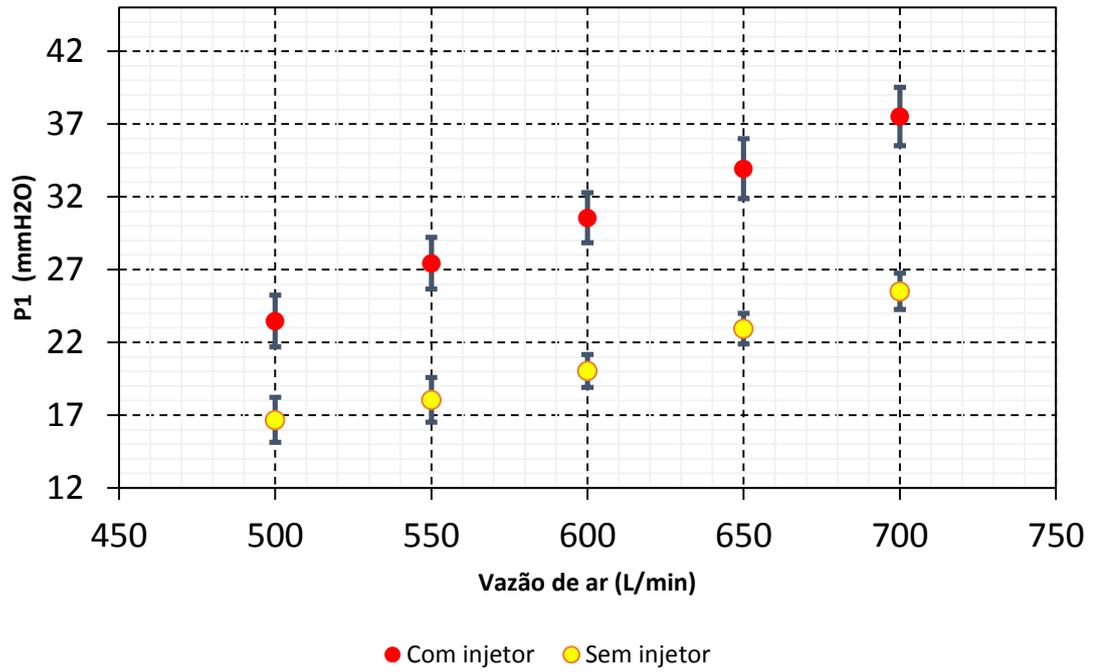
Figura 29 – Válvulas utilizadas na linha de alimentação do injetor.



Fonte: Próprio autor.

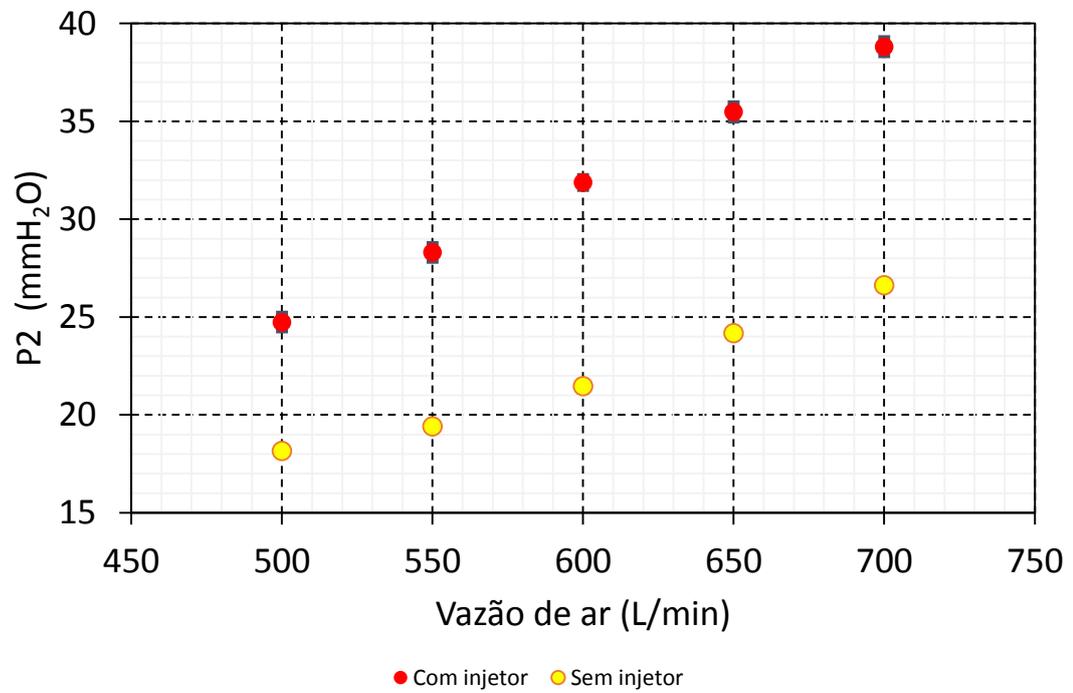
Na Figura 29 é possível notar que a válvula de regulagem está sem a alavanca. O motivo disto foi para que a abertura não seja modificada acidentalmente. Assim durante os testes com e sem injetor a passagem de ar foi liberada ou fechada por uma válvula diferente do dispositivo de regulagem mantendo assim o ajuste preciso. Os dados para os testes com e sem injetor de ar estão apresentados nas Figuras 30, 31, e 32 para o primeiro, segundo e terceiro medidor de pressão, respectivamente. Em todos os gráficos estão as barras de erro correspondem a dois desvios padrão em relação à média amostral.

Figura 30 – Medidas de pressão P1 para avaliação do injetor de ar.



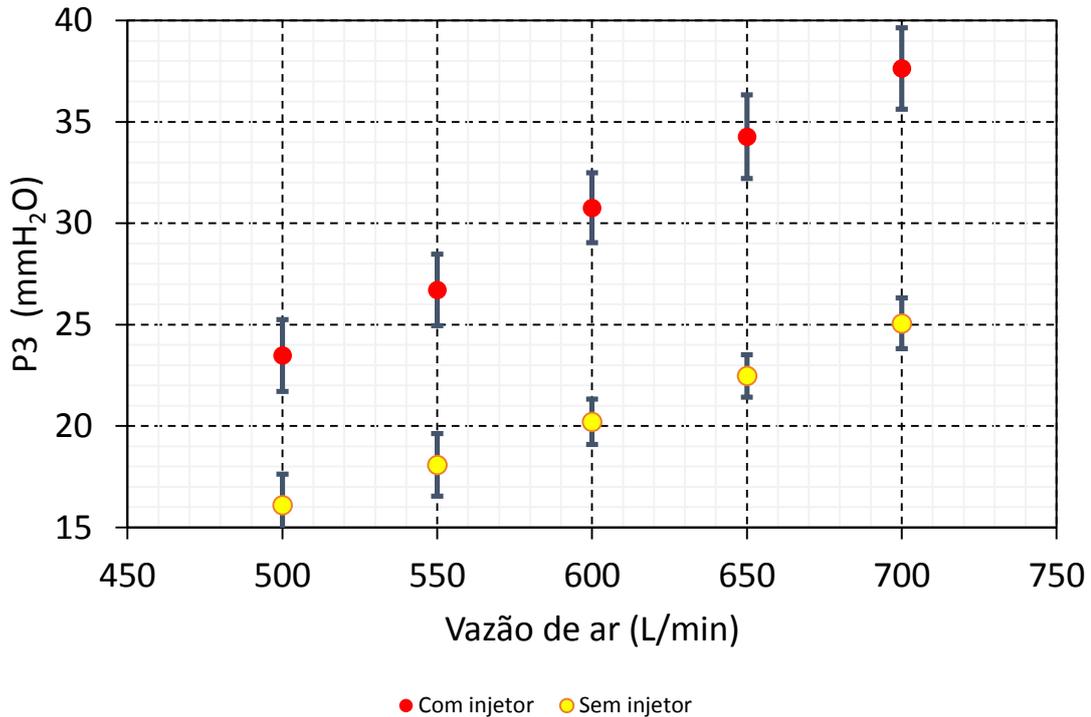
Fonte: Próprio autor.

Figura 31 - Medidas de pressão P2 para avaliação do injetor de ar.



Fonte: Próprio autor.

Figura 32 - Medida de pressão P3 para avaliação do injetor de ar.



Fonte: Próprio autor.

No gráfico das Figuras 30, 31 e 32 pode-se perceber que a introdução do injetor deslocou todas as pressões para cima. Começando pela vazão menor com o valor de 500 *L/min* até a vazão de 700 *L/min*, visualmente é possível notar que a curva sem injetor e com injetor têm valores de pressão bem definidos e distintos.

No gráfico da Figura 31 os desvios padrão para a medida de pressão são menores devido a substituição do transmissor de pressão por um de maior precisão. Dessa forma as oscilações observadas são muito pequenas para serem evidenciadas no gráfico.

Essas medidas indicam que o injetor de ar colocado na curva de saída do *riser* não apresentou nenhuma mudança aleatória. O problema de acúmulo de catalisador no trecho de entrada do vaso de separação foi solucionado resultando num aumento de precisão do inventário do catalisador.

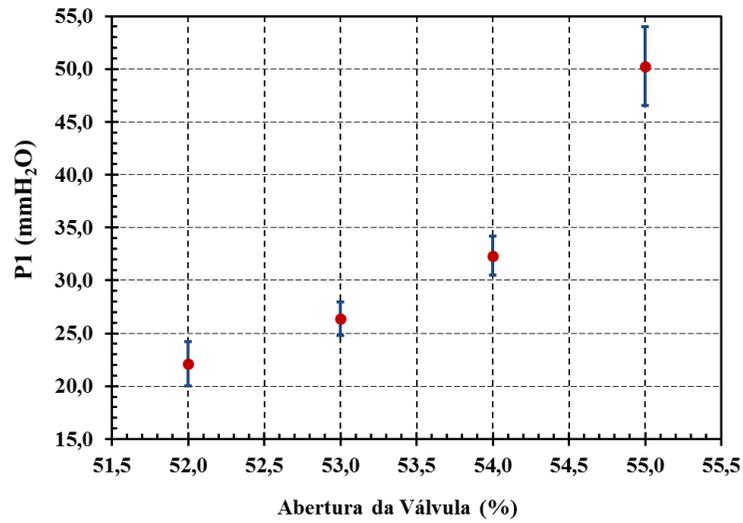
Conhecida as novas condições de operação do sistema, injetor de ar testado e vazamentos estancados, foram iniciadas uma bateria de testes com a VPC II. Os resultados desses testes estão apresentados na Seção 4.3.

4.3 Testes e análise da VPC II na UPF

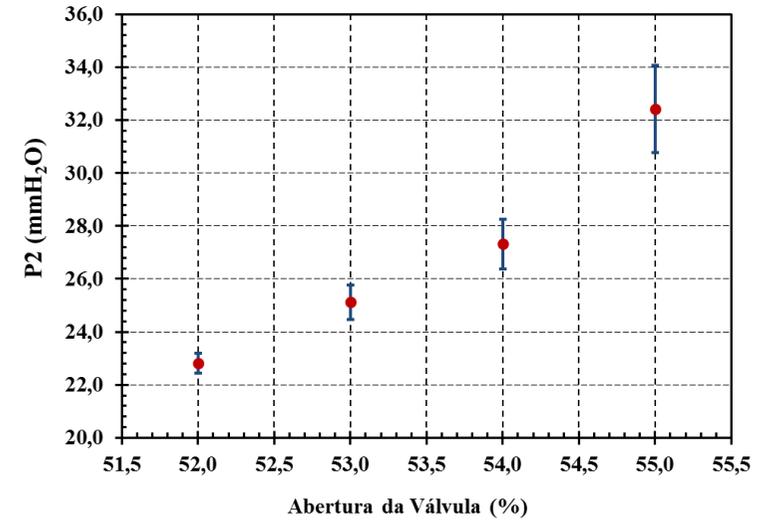
Para verificar a eficiência da VPC II no controle da injeção de catalisador e conseqüentemente a estabilidade da pressão no *riser* foram realizadas várias rodadas de experimentos como planejados na Seção 3.6.2. Os valores das variáveis medidas, para as diversas vazões de ar estão mostrados nas Figuras 33, 34, 35, 36 e 37 para as vazões determinadas na Tabela 4. Essas figuras apresentam três gráficos de pressão versus abertura da válvula correspondentes aos medidores P1, P2 e P3; e um gráfico da vazão de ar versus abertura da válvula. Em todos os gráficos as barras de erro representam dois desvios padrão em relação à média amostral. A realização dos experimentos e aquisição de dados foram feitas segundo o fluxograma apresentado na Figura 20 da Seção 3.4.4.

Os resultados para o experimento com a vazão de ar de 500 *L/min* na entrada do *riser* estão apresentados nos gráficos da Figura 33.

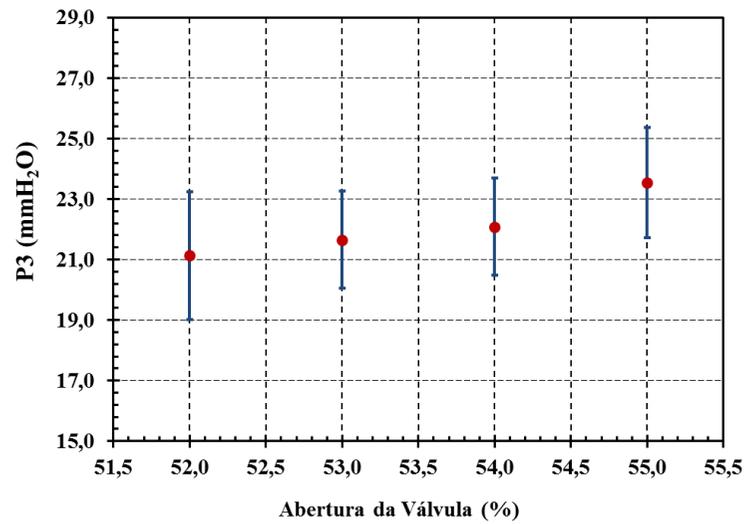
Figura 33 – Teste VPC II para vazão de 500 L/min.



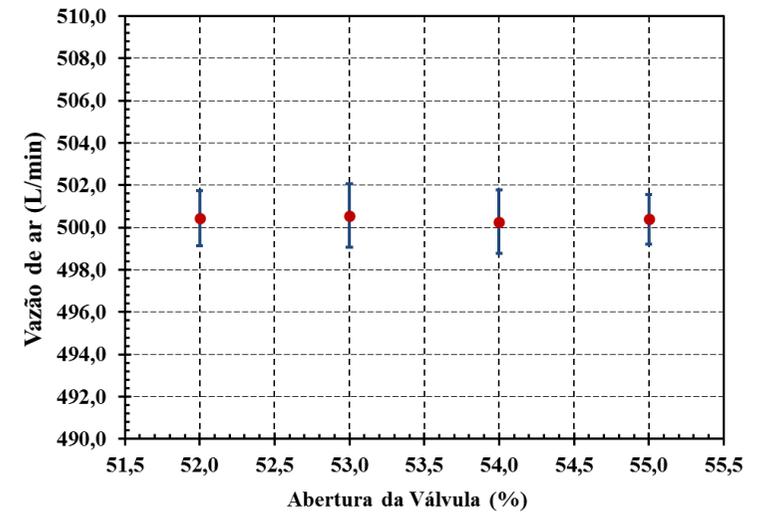
(a) P1



(b) P2



(c) P3



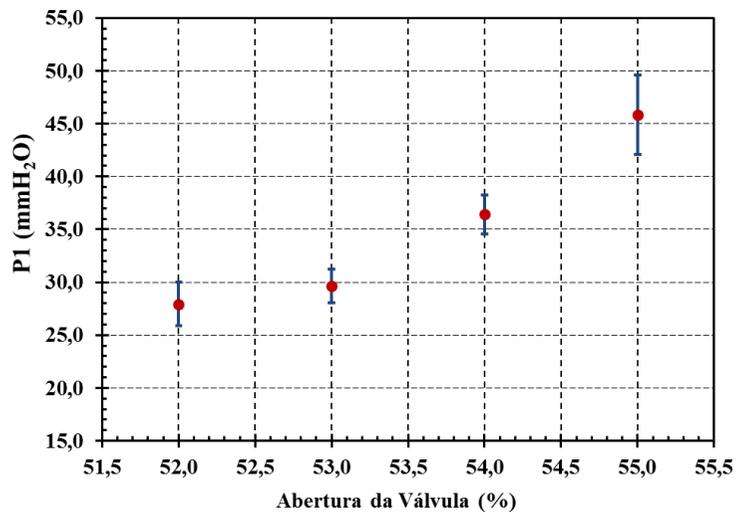
(d) Vazão volumétrica de ar, Q (L/min)

Fonte: Próprio autor.

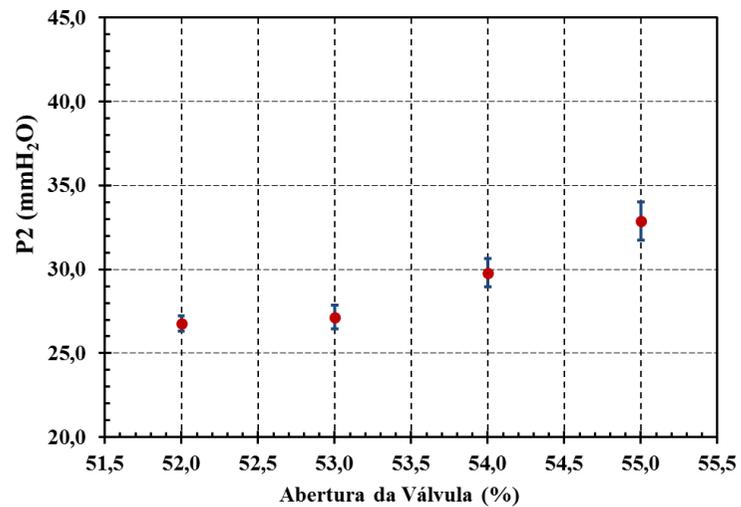
Do gráfico da Figura 33 pode-se observar que a resposta da pressão é monótona para as aberturas de 52 % a 54 %. Na abertura de 55 % ocorre um salto na pressão do medidor P1, porém o aumento de pressão nos outros medidores ainda é aparentemente linear. Isso ocorreu devido à entrada excessiva de catalisador no *riser* e incapacidade do sistema de fluidizar todo o pó enviado pela VPC II. Visualmente foi possível notar que a região inferior do *riser* ficou bastante densa e com acúmulo de catalisador. Esta situação foi considerada como um ponto de colapso do sistema. A partir da abertura de 54 % da VPC II ($Ab_{vpc} = 24\%$), para uma vazão de 500 *L/min* o sistema se torna instável. Desse modo foi definida a faixa de operação estável da VPC II para a vazão de 500 *L/min* de ar.

O próximo teste de abertura da VPC II versus pressão no *riser* foi realizado para uma vazão de 550 *L/min*. Os dados desse teste estão apresentados nos gráficos da Figura 34.

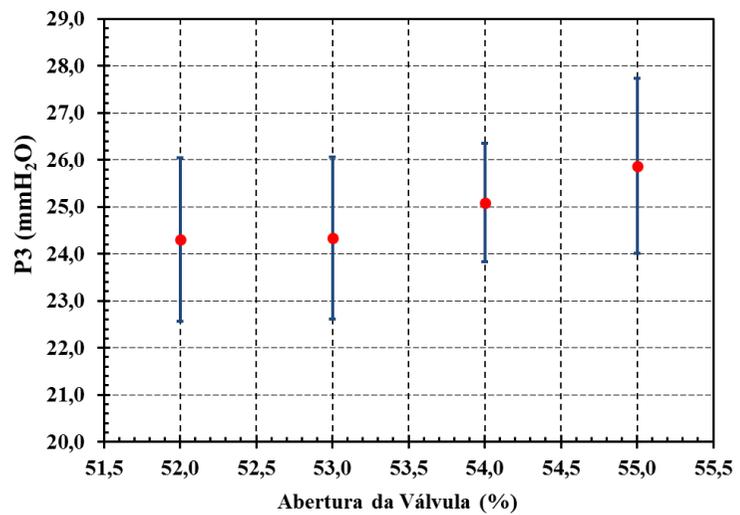
Figura 34 – Teste VPC II para vazão de 550 (L/min).



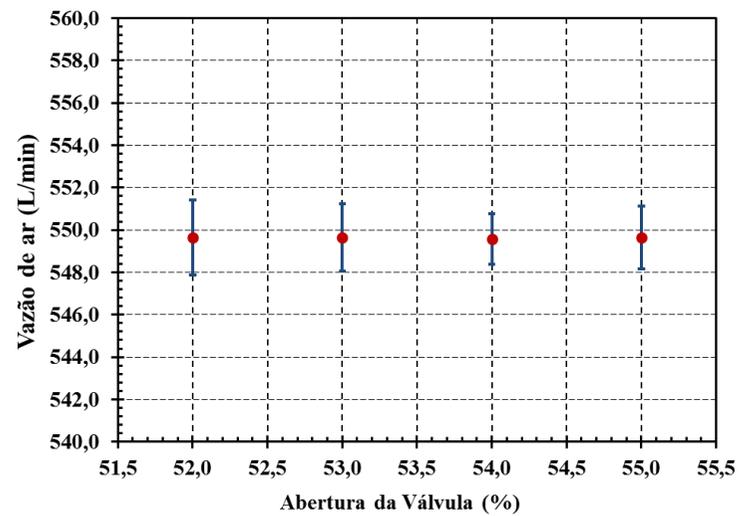
(a) P1



(b) P2



(c) P3

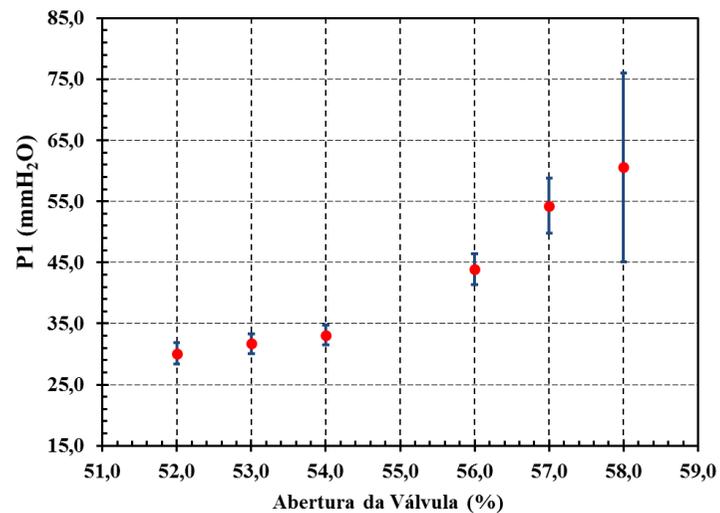


(d) Vazão volumétrica de ar, Q (L/min)

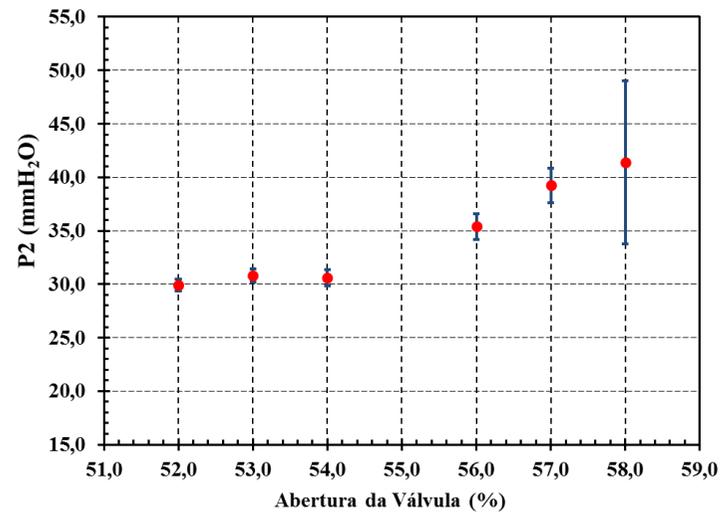
Assim como no gráfico da Figura 33, pode-se observar na figura 34 o ponto de colapso do sistema ocorre para abertura de 55 %, pois pressão sobe muito rapidamente e há acúmulo visível de catalisador na tubulação de alimentação do *riser*. Novamente o limite de operação para uma vazão de 550 *L/min*, em condições estáveis, da UPF é o mesmo que o da vazão de 500 *L/min*.

O próximo teste de abertura da VPC II versus pressão no *riser* foi realizado para uma vazão de 600 *L/min* e os resultados estão apresentados nos gráficos da Figura 35.

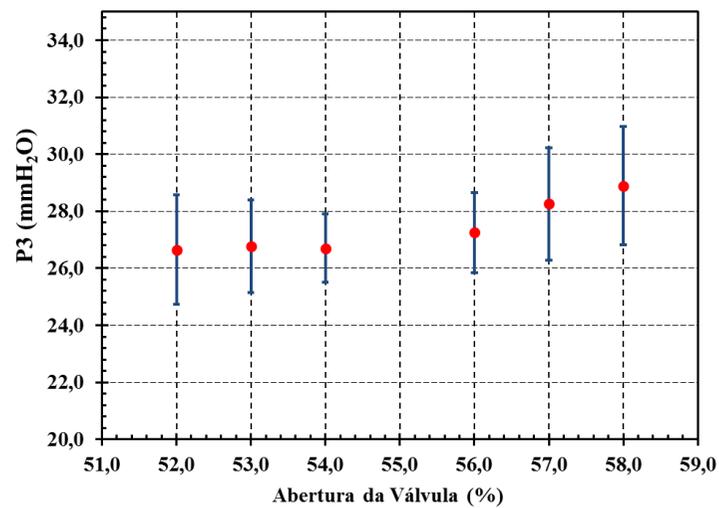
Figura 35 - Teste VPC II para vazão de 600 (L/min).



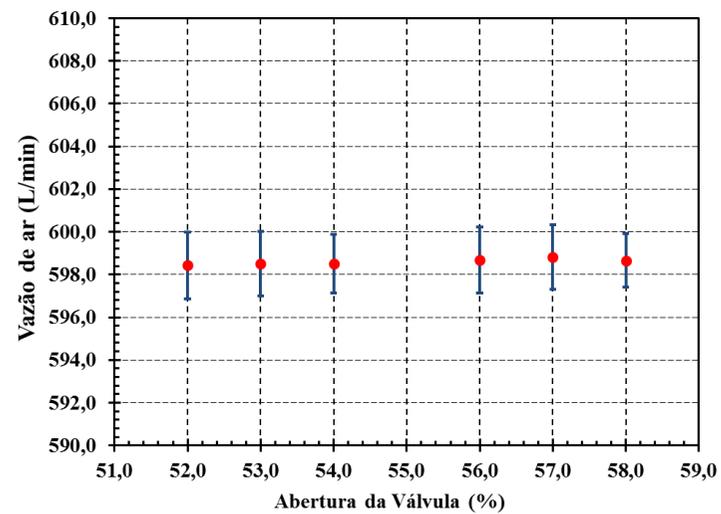
(a) P1



(b) P2



(c) P3



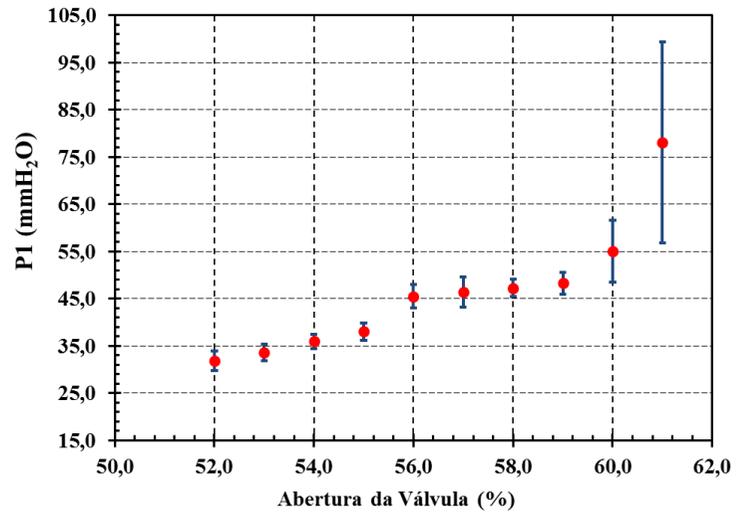
(d) Vazão volumétrica de ar, Q (L/min)

Fonte: Próprio autor.

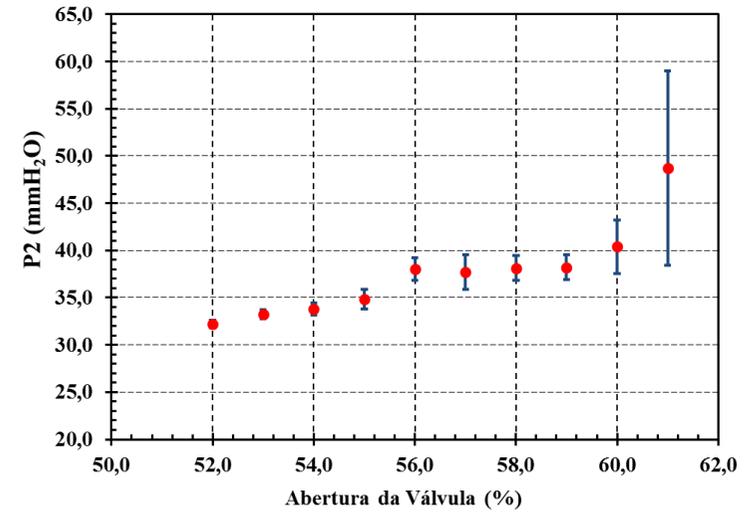
No gráfico apresentado na Figura 35, pode-se notar que a faixa de operação da VPC II. Novamente a válvula foi aberta continuamente até o sistema do leito fluidizado entrar em colapso. Nesse caso para a vazão de 600 *L/min* o sistema entrou em colapso para uma abertura de 58 %. Antes desta abertura a pressão se mostrou estável, com poucas oscilação e desvios em torno da média. Em comparação com os dados de pressão obtidos nas vazões de 500 *L/min* e 550 *L/min* é observado para a vazão de 600 *L/min* uma faixa maior de operação devido ao aumento da capacidade de fluidização no *riser*.

O próximo teste de abertura da VPC II versus pressão no *riser* foi realizado para uma vazão de 650 *L/min* e os resultados estão apresentados nos gráficos da Figura 36.

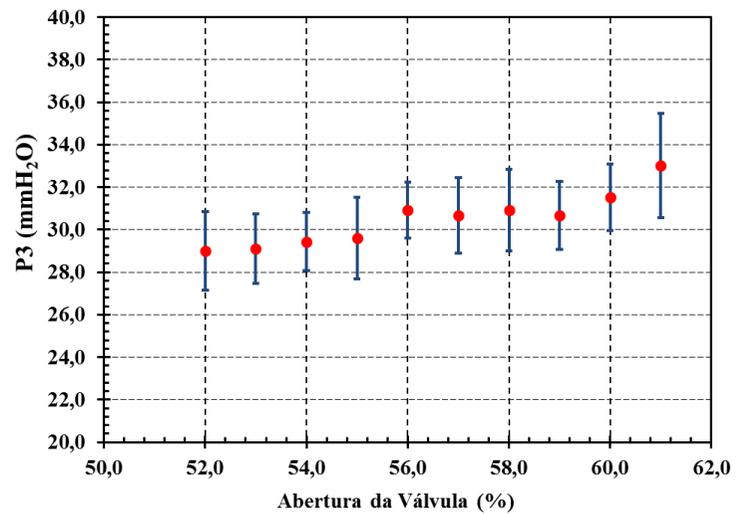
Figura 36 - Teste VPC II para vazão de 650 (L/min).



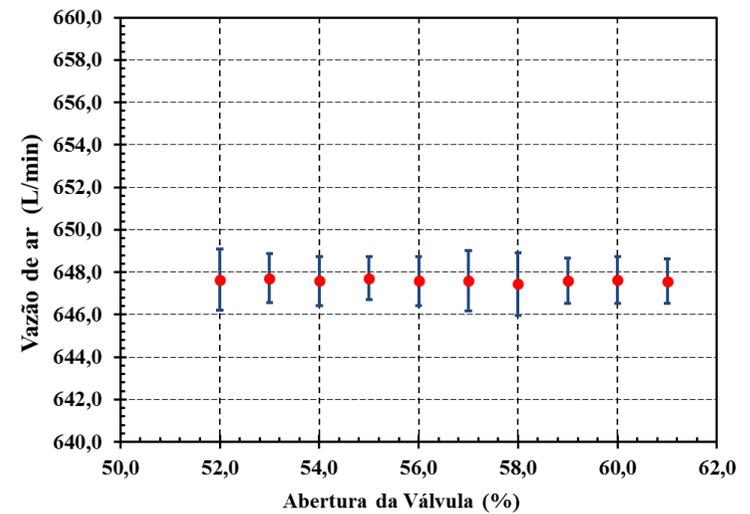
(a) P1



(b) P2



(c) P3



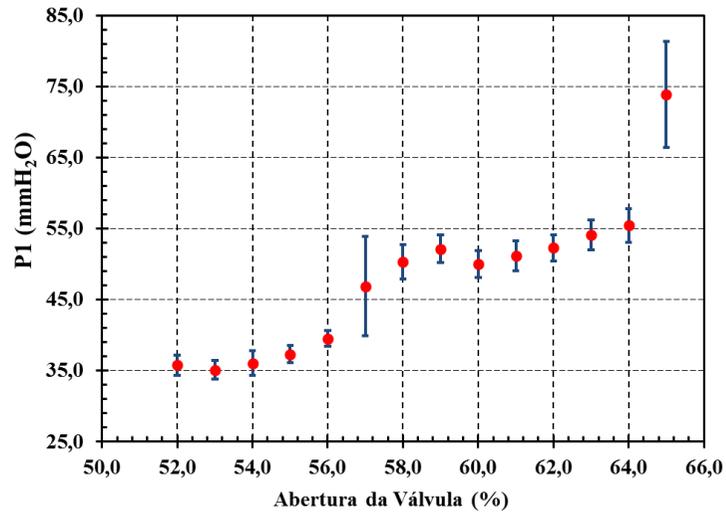
(d) Vazão volumétrica de ar, Q (L/min)

Fonte: Próprio autor.

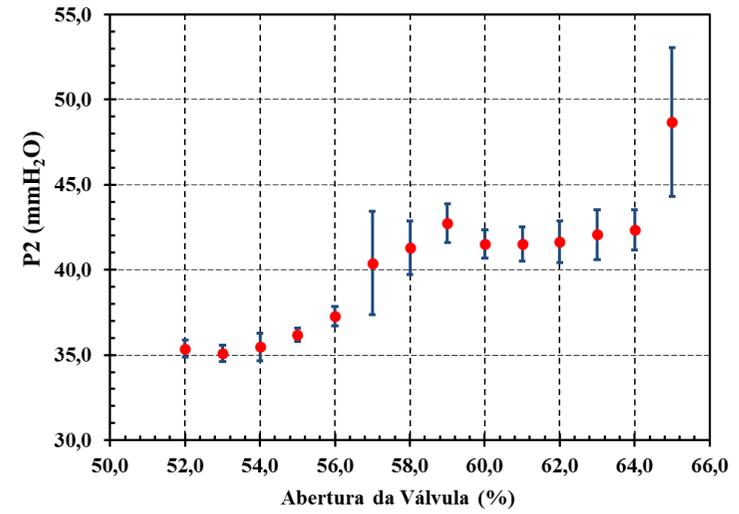
Nos gráficos (a), (b) e (c) da Figura 36 é possível observar a maior faixa de operação estável do sistema antes de entrar em colapso para a vazão de ar de 650 L/min . Nesse caso o sistema entra em colapso para uma abertura de 61 %, na qual ocorre um salto da pressão para $77 \text{ mmH}^2\text{O}$. Antes do colapso o sistema se mostrou estável na manutenção das pressões no *riser* para uma dada abertura da VPC II.

O próximo teste de abertura da VPC II versus pressão no *riser* foi realizado para uma vazão de 700 L/min e os resultados estão apresentados nos gráficos da Figura 37.

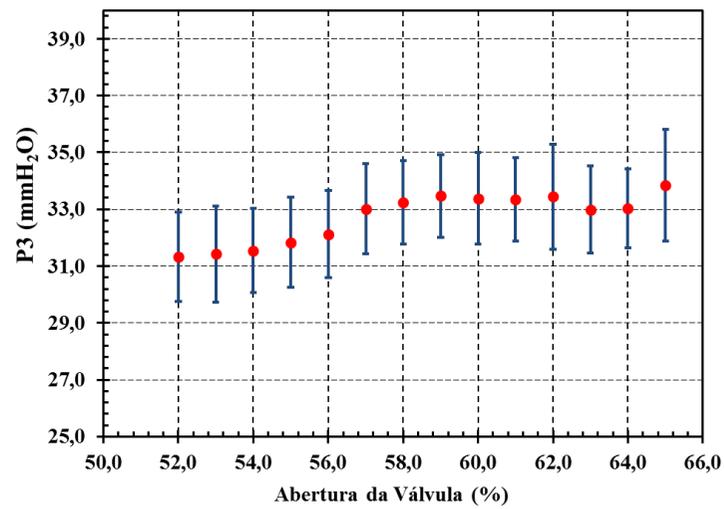
Figura 37 – Teste VPC II para vazão de 700 (L/min).



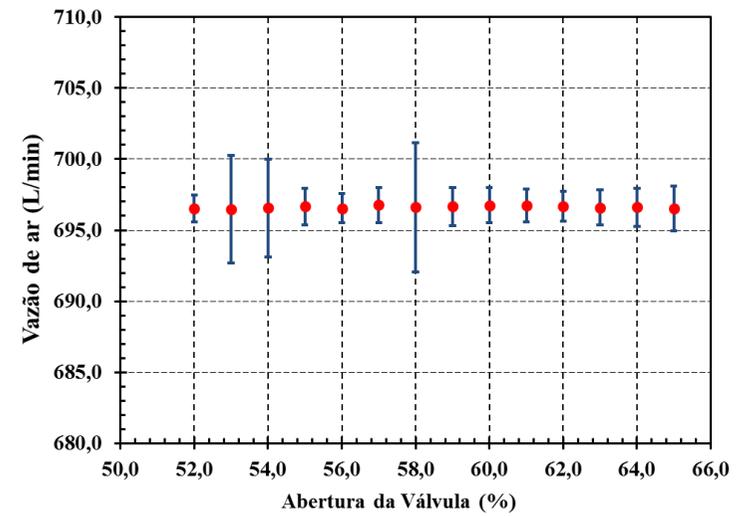
(a) P1



(b) P2



(c) P3



(d) Vazão volumétrica de ar, Q (L/min)

Fonte: Próprio autor.

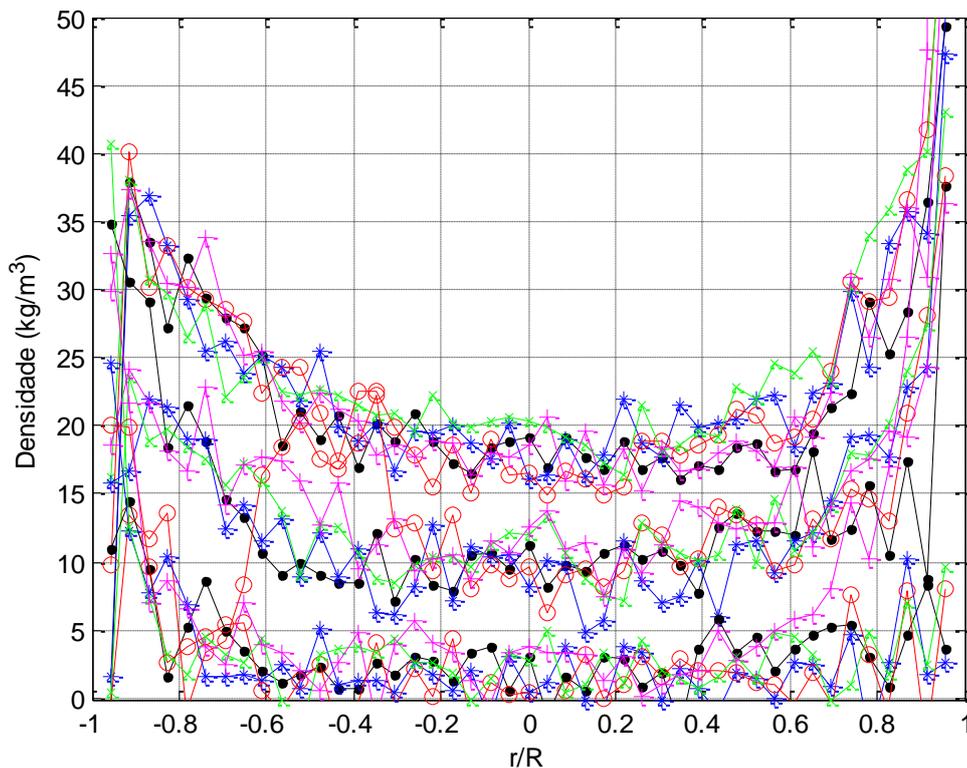
Nesse último gráfico dos experimentos realizados com a VPC II uma maior faixa de operação estável para as pressões no *riser* foi obtida. Esse resultado era esperado, pois, a vazão de ar ajustada para 700 L/min, têm mais capacidade para fluidizar os sólidos que chegam ao *riser*. Em todas as figuras os gráficos da vazão de ar versus abertura da válvula, correspondem as medidas de pressão nos outros três gráficos, mostram o comportamento da variável independente vazão de ar, referência do sistema de controle.

De um modo geral os experimentos com VPC II, foram muito importantes para verificar se a operação da válvula era estável. Em consequência desses experimentos, foi obtida a faixa de operação da abertura da válvula, em diferentes vazões de ar comprimido. Foi observado um crescimento, contínuo da faixa de operação da VPC II, com o aumento da vazão de ar. Os limites da faixa de operação foram definidos quando o sistema entrou em colapso, ou seja, o catalisador enviado pela VPC II para o *riser* não foi fluidizado e se acumulou na tubulação que liga válvula à base do *riser*.

4.4 Medidas com transmissão gama

Os movimentos das mesas com fonte e detector no *riser* na UPF são coordenados pelo sistema descritos na Secção 3.4.5.1. A intensidade da radiação e os espectros gama gerados são arquivados no banco de dados como mostrado no fluxograma da Figura 20. Na Figura 38 está apresentada a distribuição da densidade ao longo do raio normalizado, obtido com medidas da transmissão gama. Nessa figura os três conjuntos de dados, com cinco repetições cada, correspondem à três vazões de ar de 500 600 700 L/min mantendo-se a injeção de sólidos constante.

Figura 38 – Distribuição radial da densidade do catalisador medida com transmissão gama

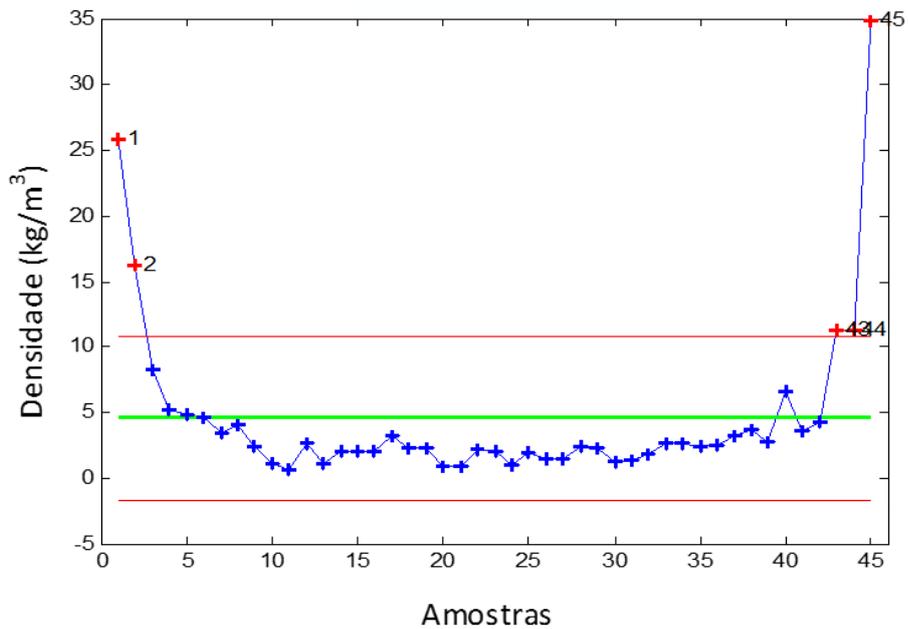


Fonte: Próprio autor.

Com as repetições das medidas de transmissão gama na Figura 38, pode-se observar que o sistema permaneceu estável com as oscilações estatísticas e do fluxo, indicativos de regime estacionário. A distribuição radial de sólidos em regimes de transporte diluído e denso, também podem ser observados na Figura 38. Os dados da Figura 38 que correspondem aos gráficos de 500 e 700 [L/min], correspondentes às densidades mais baixas e mais altas, estão apresentados

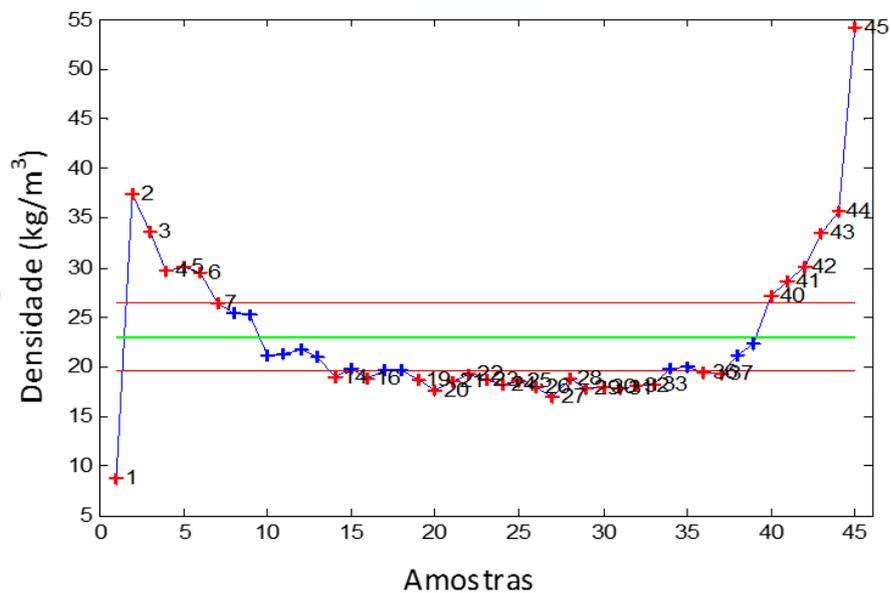
na Figuras 39 e 40, respectivamente. Em ambos os gráficos, os valores médios das cinco repetições estão representados pela linha verde e a linha vermelha representa dois desvios padrões em torno da média. No eixo das abcissas as amostras foram medidas com intervalo de 2 mm entre os pontos. A Figura 39 e 40 apresentam a distribuição de densidade em regime diluído e denso respectivamente.

Figura 39 - Perfil varredura gama para escoamento com pouco sólido.



Fonte: Próprio autor.

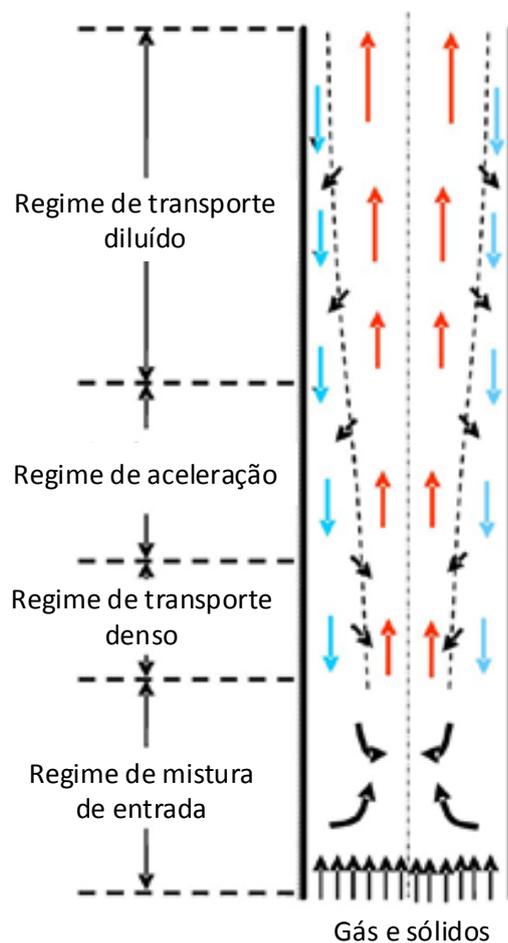
Figura 40- Perfil varredura gama para escoamento denso.



Fonte: Próprio autor.

Em comparação com a Figura 38, o gráfico da Figura 39 apresenta um perfil que podemos identificar como modelo anular e da outra figura como modelo de núcleo. Esses modelos de escoamento no *riser* estão descritos por Davidson (2000). No modelo de escoamento de núcleo a densidade do fluxo é maior na parte central do tubo e anular é maior nas paredes. Esses modelos são utilizados por Zhu e Dawel (2010) para caracterizar um problema típico do reator de FCC, que está esquematizado na Figura 41, a recirculação de sólidos em regime de transporte denso.

Figura 41 - Modelo de escoamento núcleo anular.



Fonte: Adaptado de Zhu e Dawel (2010).

No modelo representado na Figura 41, existe um escoamento descendente de sólidos próximo das paredes do *riser* e um escoamento ascendente no centro do tubo que correspondem aos modelos núcleo e anular. Observe que ocorre transporte de partículas ao longo do raio, num processo de interação entre os dois modelos que representam o escoamento núcleo anular no *riser*.

Esse problema requer modelagem uma vez que o fluxo de partículas que fica em circulação tem distribuição de tempos de residência maior do que o fluxo que circula. Esse é um problema do reator industrial e isso tem desafiado os pesquisadores. Os modelos fluidodinâmicos simulam adequadamente o escoamento diluído, mas, em regime denso como apresentado na Figura 41, se afasta da predição teórica. Naturalmente as medidas das variáveis envolvidas não conseguem ser ajustadas pelos modelos e conseqüentemente também se afastam da modelagem do controle.

Em resumo, as medidas com a transmissão gama mostraram que a VPC II está proporcionando condições adequadas de operação da UPF. Em condição de fluxo, os gráficos da Figura 38, com cinco repetições cada, mostram estabilidade das condições de operação em regime estacionário. As limitações na modelagem da VPC II estão situadas nos limites do conhecimento da fluidodinâmica conforme a discussão com a literatura citada e apresentada na Figura 41 que mostra um problema típico do reator de FCC. Os aperfeiçoamentos dos modelos físicos da UPF apontam na direção de melhor compreensão da fluidodinâmica e da possibilidade de modelar o controle do processo.

5. CONCLUSÃO

O novo injetor de sólidos no *riser* da UPF funciona sem problema de desgaste por abrasão e quanto à sua durabilidade em operação, certamente, é o mais competitivo no ramo.

O novo injetor, a válvula VPC II, possibilitou o controle automatizado das condições de operação da UPF, com controle da injeção de sólidos e conseqüentemente da pressão no *riser*. As medidas com transmissão gama comprovaram que o escoamento no *riser*, com a VPC II, obedece às condições previstas na literatura.

Os experimentos mostraram que a situação crítica na operação da unidade que ocorre com o transporte de sólidos em fase densa o chamado “ponto de colapso” ficou bem determinado com a abertura da VPC II.

Em correspondência ao intervalo de abertura da VPC II o ponto de colapso é previsto, com precisão, observando-se o perfil de pressão.

Com a reforma da UPF aumentou-se a visibilidade do sistema, permitindo observar o que acontece no *riser*, na região do colapso durante a injeção de sólidos.

A melhor precisão nas medidas com o catalisador em circulação e na avaliação do inventário foi obtida com a reforma da UPF e especificamente com o soprador de sólidos na saída do *riser*, cuja estabilidade de operação foi proporcionada pelo desempenho da VPC II.

As correlações são efetivas para quantificar o controle de operação da UPF, no entanto, um modelo matemático para o injetor de sólidos não foi formulado ainda. Para atingir esse objetivo, chegar à função adequada que vai controlar a dinâmica do sistema, uma melhor compreensão da fluidodinâmica com o transporte de sólidos na fase densa é necessária. Esse problema, com as devidas proporções, se verifica também na unidade de FCC industrial.

Está em andamento o processo de solicitação de patente da válvula VPC.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Análise detalhada dos dados e correlações obtidas para formular modelo matemático que descreva o controle em função das variáveis do processo. Para atingir essa meta provavelmente será necessária uma metodologia de avaliação da incerteza total do processo e comparação com os dados de literatura.

REFERÊNCIAS

- ALI, H.; ROHANI, S.; CORRIOU, J.P., Modelling and control of a riser type Fluid Catalytic Cracking (FCC) unit. **Institution of Chemical Engineers**, v. 75, i. 4, p. 401-412, 1997.
- AL-DIN, N.; GUNN, D. J. Metering of solids by a Rotary valve feeder. **Powder Technology**, v. 36, p. 25-31, 1983.
- BALCHEN, J.G.; STRAND, S. L., State-space predictive control. **Chemical Engineering Science**, v. 47, i. 4, p. 787-807, 1992.
- BEVERLOO, W. A.; LENIGER H. A.; VELDE, J. V. The flow of granular material through orifices, **Chemical Engineering Science**, v. 15, p. 260-296, 1961.
- CHEN, YE-MON. Applications for Fluid Catalytic Cracking. In: YANG WEN-CHING; **Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems**. 1. ed. New York: Marcel Dekker, 2003. cap. 14, p. 384-401.
- 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**, vol. 251, p. 201-208, 2006.
- DANTAS, C. C.; MOURA, A. E.; LIMA FILHO, H. J. B.; MELO, S. B.; SANTOS, V. A.; LIMA, E. A. O. Uncertainty evaluation by gamma transmission measurements na CFD model comparison in FCC cold pilot unit, **International Jornal of Metrology and Quality Engineering**, vol. 4, p. 9-15, 2013.
- 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.
- DUNN, W. C. **Fundamentos de instrumentação industrial e controle de processos**. 1.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 326 p.
- GELDART, D. Types of gas fluidization. **Powder Technology**, v. 7, p. 285-292, 1973.
- GLICKSMAN, L. R.; Fluidized Bed Scaleup. In: YANG WEN-CHING; **Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems**. 1. ed. New York: Marcel Dekker, 2003. cap 13, p. 348-383.
- GRIECO, E.; MARMO, L. Predicting the pressure drop across the solids flow rate control device of a circulating fluidized bed. **Powder Technology**, v. 161, p. 89-97, 2006.

HORIO, M.; KOBYLECKI, R. P.; TSUKADA, M.; Instrumentation and measurements. In: **Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems**. 1. ed. New York: Marcel Dekker, 2003. cap. 25, p. 644-695.

HOVD, M.; SKOGESTAD, M., Procedure for regulatory control structure selection and application to the FCC process, **American Institute of Chemical Engineering**, v. 39, n. 12, p. 1938-1953, 1993.

HUI, L.; BIAHUA, C.; CHENGYUE, L. Identification of hydrodynamic similarity in *risers* of circulating fluidized beds. **Chemical Engineering Science**, vol. 55, p. 2741-2744, 2000.

JIA, C.; ROHANI, S.; JUTAN, A. FCC unit modeling, identification and model predictive control, a simulation study. **Chemical Engineering and Processing**, v. 42, i. 4 , p. 311-325, 2003.

JONES, D. R. M.; DAVIDSON, J. F. The flow of particles from a fluidized bed through orifices, **Rheologica Acta**, v. 4, i. 3, p. 180-192, 1965.

JUDD, M. R.; DIXON, P. D. The flow of dense solid down a vertical standpipe, **American Institute of Chemical Engineering**, Chicago, 1976.

LIMA, A. C.; SANTOS, V. A.; DANTAS, C. C.; FINKLER. Análise da distribuição do tamanho do catalisador em um *riser* de unidade de craqueamento catalítico fluido (FCC) de petróleo. In: **XVII Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ**, Recife/PE, 2008.

LIMA FILHO, H. J. B. **Validação de modelos CFD bi e tridimensionais de um riser piloto a frio com auxílio de medidas de transmissão gama**. Recife, 2014. 121p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de Pernambuco.

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.

KNOWLTON, T. M.; Standpipes and return systems. In: GRACE, J. R.; AVIDAN, A. A.; KNOWLTON, T. M.; **Circulating Fluidized Beds**. 1. ed. London: Blackie Academic and Professional, 1997. cap. 7, p. 214-259.

KRISHNA, R.; BATEN, J. M. Using CFD for scaling up gas-solid bubbling fluidised bed reactors with Geldart A powders, **Chemical Engineering Journal**, vol. 82, p.247-257, 2001.

RÜDISÜLI, M.; SCHILDHAUER, T. J.; BIOLLAZ, S. M. A.; OMMEN, J. R. V. Scale-up of bubbling fluidized bed reactors: A review, **Powder Technology**, vol. 217, p. 21–38, 2012.

MARTIN, M. P.; TURLIER, P.; BERNARD, J. R.; WILD, G. Gas and solid behavior in cracking circulating fluidized beds. **Powder Technology**, vol. 70, p.249, 1992a.

MARTIN, M. P.; DEROUIN, C.; TURLIER, P.; FORISSIER, M.; WILD, G.; BERNARD, J. R. Catalytic cracking in *riser* reactors: core annulus and elbow effects. **Chemical Engineering Science**, vol. 47, p.2319, 1992b.

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

NASCIMENTO, R.; TRIGUEROS, D. E. G.; MÓDENES, A. N. Determinação do ponto de colapso em leitos fluidizados. **Varia Scientia**, vol. 7, p.135-146, 2007.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 809 p.

PATIENCE, G. S.; CHAOUKI, J.; BERRUTI, F.; WONG, R. Scaling considerations for circulating fluidized bed *risers*. **Powder Technology**, vol. 72, p. 31-37, 1992.

SANTANA, C. C. Fenômenos de transporte no contato gás-sólido: leito móveis em fase diluída. In: Freire, J. J.; GUBULIN J. C. (Eds.) **Tópicos especiais de sistemas particulados**, v. 2. São Carlos: Universidade de São Carlos, 1986.

SANTOS, V. A.; DANTAS, C. C.; LUNA-FINKLER, C. L.; SOUZA, J. E. G. Principal component analysis in na experimental cold flow modelo of a fluid catalytic cracking unit by gammametry, **Progress in Nuclear Energy**, vol. 53, p. 1114-1118, 2011.

SOUZA, J. A.; **Simulação numérica e otimização termodinâmica de risers de craqueamento catalítico em leito fluidizado para a máxima produção de combustíveis**, Tese (Departamento de engenharia mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

VIEIRA, W. G.; SANTOS, V. L. M.; CARVALHO, F. R.; PEREIRA, J. A. F. R.; FILETI, A.M.F. Identification and predictive control of a FCC unit using a MIMO neural model. **Chemical Engineering and Processing**, v.44, p. 855-868, 2005.

WILSON, J. W. **Fuid catalytic cracking technology and operation**, 1.ed. Tulsa, Oklahoma: Pennwell Publishing Company, 1997. 323p.

WIRTH, K.E.; MOLERUS, O.; SEITER, M. Feststoffkonzentration und –geschwindigkeiten in wandnahen Bereichen zirkulierender Wirbelschichten. **VGB-Kraftwerkstechnik** Vol. 10, p.925-929, 1991.

WONG, R.; PUGSLEY, T.; BERRUTI, F. Radial voidage profile and flow structure in *risers* of circulating fluidized beds. **Chemical Engineering Science**, vol. 47, p. 2301, 1992.

YAZDANPANA, M. M.; FORRET, A.; GAUTHIER, T.; DELEBARRE, A. An experimental investigation of L-valve operation in an interconnected circulating fluidized bed system. **Powder Technology**, v. 221, p. 236-244, 2012.

YIN, S.; JIN, B.; ZHONG, W.; LU, Y.; SHAO, Y.; LIU, H. Gas-solid flow behavior in a pressurized high-flux circulating fluidized bed *riser*. **Chemical Engineering Communications**, v. 201, p. 352-366, 2013.

ZLOKARNIK, M. **Scale-up in Chemical Engineering**. 1.ed. Germany: WILEY-VCH, 2002.225p.

ZHU, C.; DAWEI, W. Resistant effect of non-equilibrium inter-particle collisions on dense solid transport. **Particuology**, vol. 8, p. 544-548, 2010.