

### 3 - SISTEMA EXPERIMENTAL

O sistema experimental utilizado neste trabalho é constituído por dois reatores de leito fluidizado atmosférico borbulhante, e seus periféricos. Os reatores foram denominados de planta de bancada e de planta piloto, os quais são descritos a seguir.

#### 3.1 - Planta de bancada

A planta de bancada é constituída por um reator de leito fluidizado de forma cilíndrica, construído em aço inoxidável 304, com diâmetro interno de 0,160 m, espessura de parede de 3 mm, e altura de 0,450 m. Na Figura 3.1 mostra-se um esquema da planta de bancada. Inicialmente o leito é formado por 2 kg de areia com diâmetro médio 500 µm. Essa massa de areia é fluidizada com ar aquecido até sua temperatura atingir 500 °C e velocidade superficial de 0,6 m/s. Nessa condição carvão é adicionado no leito a uma taxa constante até atingir-se uma temperatura em torno de 900 °C. Nesse instante, aciona-se a válvula de esfera da linha de ar frio e fecha-se a válvula de esfera da linha de ar quente. Naturalmente a temperatura do leito cai, necessitando um aumento na taxa de alimentação de carvão de tal maneira a obter-se uma condição de operação em regime permanente numa temperatura em torno de 850 °C. Nessa condição, parte do isolamento térmico é retirado do corpo do reator para que se consiga operar com velocidade de fluidização e temperatura do leito em torno de 0,60 m/s e 850 °C, respectivamente. Uma amostra dos gases de combustão emitidos na descarga é extraída continuamente para os analisadores de gases que medem concentrações de CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e THC. Atingida a condição de regime, começa-se a adição de calcário a uma taxa inicial constante, de tal maneira a ter-se relação Ca/S = 2. Novamente espera-se que seja reestabelecida a condição de regime e em seguida a taxa de alimentação de calcário é novamente elevada dando relação Ca/S de 3, e assim por diante, até chegar-se à relação Ca/S=5. As informações das concentrações, velocidades

de fluidização e temperaturas lidas são constantemente armazenadas por um sistema de aquisição de dados devidamente instalado. As cinzas são constantemente drenadas por um tubo que adentra ao leito, mantendo seu nível constante. O material elutriado retido no ciclone é drenado periodicamente. Existem duas válvulas de esfera para descarga rápida do leito, permitindo flexibilidade e rapidez na troca do leito.

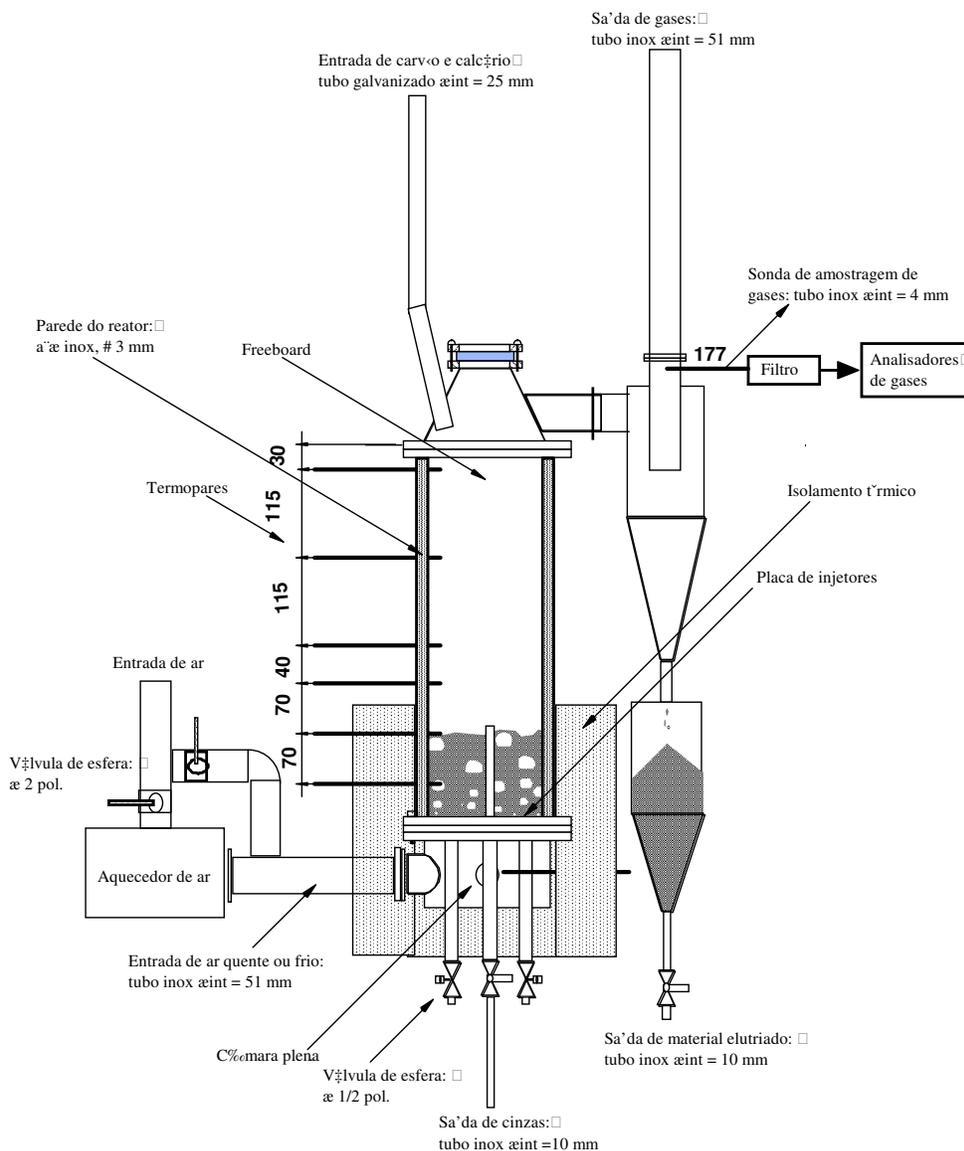


Figura 3.1 - Esquema da planta de bancada.

Na Figura 3.2 apresenta-se uma vista geral da planta de bancada, destacando-se o aquecedor de ar (horizontal), quadro de controle e reator (vertical) com termopares, sondas de pressão e porta de entrada de carvão e de calcário. Na Figura 3.3 apresenta-se a planta de bancada em operação com combustão de carvão. Destaca-se na região do leito a área incandescente, e parcialmente envolvida por isolamento térmico de fiber frax.



Figura 3.2 – Vista geral da planta de bancada.



Figura 3.3 – Vista da planta de bancada em operação com combustão de carvão.

### 3.2 - Planta piloto

A planta piloto é constituída por um reator de leito fluidizado com seção quadrada, construído em aço inoxidável 304 e aço carbono 1020, com lado interno de 0,50 m, espessura de parede de 10 mm, e altura de 3,0 m. Na Figura 3.4 é apresentado um esquema da planta piloto, mostrando o reator propriamente dito, composto por 5 módulos de 0,6 m de altura.

O primeiro módulo, de baixo para cima, é o módulo do leito e é todo contruído em aço inoxidável 304. Nele estão dispostos quarenta e dois tubos trocadores de calor, feitos de aço inoxidável 310 com diâmetro externo de 10 mm e espessura de 2,25 mm. Estes trocadores não foram utilizados nos testes deste trabalho. O módulo do leito também possui dezesseis orifícios frontais de diâmetro 20 mm para inserção de sondas para medidas de temperatura, pressão e concentração de gases na região do leito. Ainda no primeiro módulo estão três saídas com diâmetro de 50 mm, cada uma com sua respectiva válvula de borboleta, responsáveis pelo controle do nível de altura do leito através da drenagem contínua de cinzas, que são armazenadas num depósito apropriado. Os níveis de altura do leito possíveis são 0,15 m, 0,30 m e 45 m. Existe também uma saída de diâmetro 50 mm para drenagem total do leito pelo fundo. Finalmente na base deste módulo estão a câmara plena, a placa de injetores distribuidores de ar e as entradas para ar e gás GLP. Este último é alimentado através de três cilindros de 45 kg de gás, armazenados em local e condições apropriadas do lado externo do laboratório.

Os módulos restantes são todos em aço carbono 1020. No segundo módulo estão uma porta de inspeção com dimensões 0,46 m por 0,40 m, quatro orifícios com diâmetro de 20 mm para insersão de sondas, um maçarico piloto para aquecimento inicial do leito e as duas entradas de diâmetro 100 mm para material sólido particulado: uma para carvão e outra para calcário ou areia. Esses materiais são armazenados em silos separados, cada um com capacidade de 500 kg, e enviados ao leito por gravidade com controle de vazão feito através de válvulas rotativas calibradas. No caso da carga de areia para formar o leito inicial do reator, a mesma é feita empregando-se o silo de carregamento.

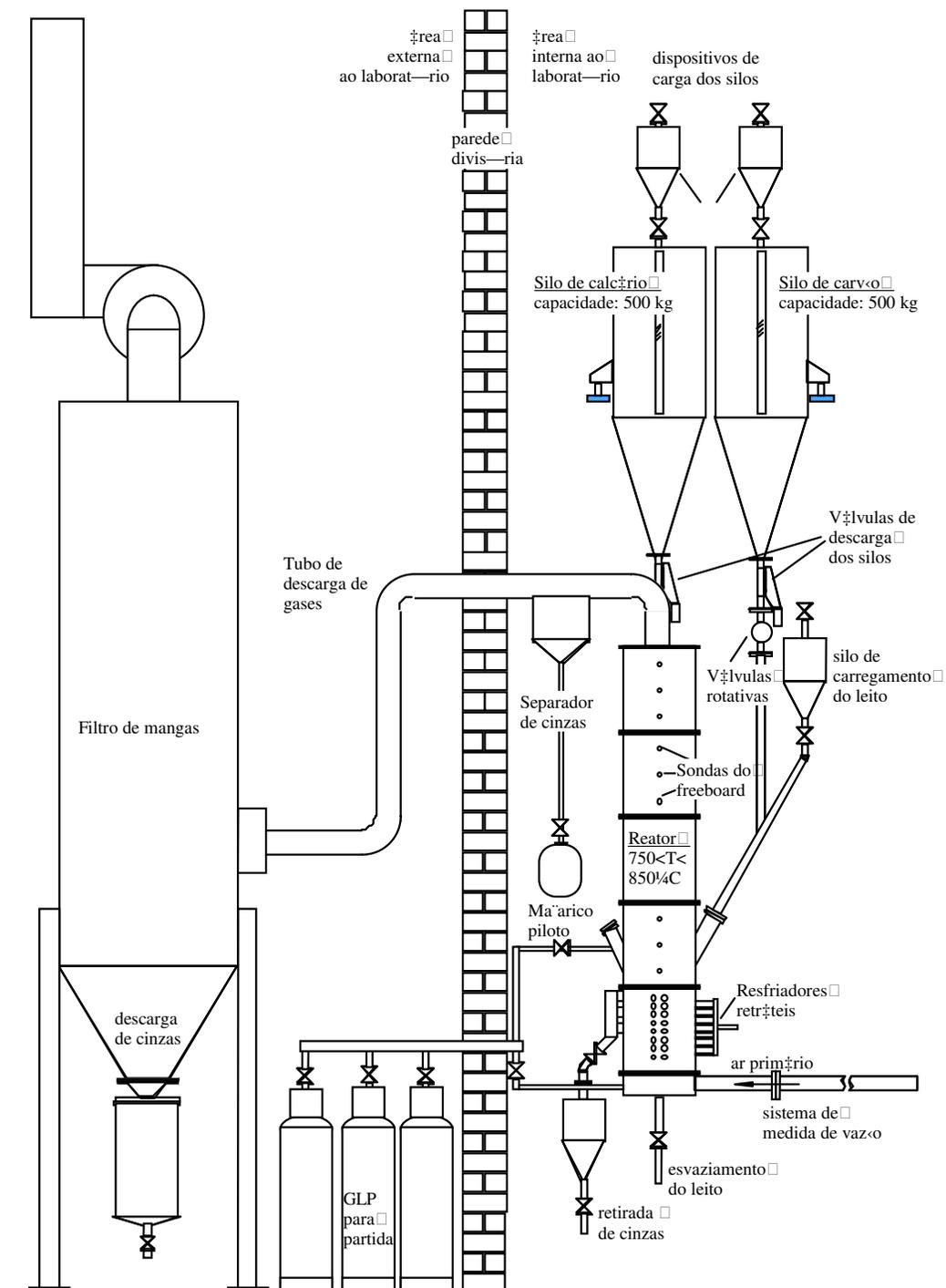


Figura 3.4 – Esquema da planta piloto.

Os dois módulos seguintes do “freeboard possuem somente quatro orifícios cada um com diâmetro de 20 mm para inserção de sondas. No quinto módulo existe uma portinhola de inspeção com diâmetro 100 mm, mais quatro orifícios com diâmetro de 20 mm para inserção de sondas e o duto de descarga de gases com diâmetro 200 mm. Os gases de combustão seguem por este duto onde, na primeira parte horizontal existe uma caixa separadora que retém uma parte do material particulado gerado e elutriado do leito enviando-os para um recipiente apropriado. O fluxo de gases prossegue para o filtro de mangas, onde é previamente diluído com ar ambiente logo no bocal de entrada para evitar que o material das mangas seja danificado ou entre em combustão pela temperatura excessiva dos gases. O material particulado retido nas mangas é precipitado num reservatório para descarga de cinzas. Esta precipitação é feita com ajuda de jatos periódicos de ar comprimido que limpam as mangas impregnadas de pó. Os gases que passam pelas mangas são extraídos por um exaustor e descarregados na atmosfera.

Para operação de combustão, utiliza-se um leito de areia com massa de 70 kg e diâmetro médio 500  $\mu\text{m}$ . O leito é fluidizado inicialmente com ar frio na velocidade superficial de 0,4 m/s e depois ele é aquecido rapidamente a 700 °C com a queima de GLP no seu interior e no queimador piloto. Nessa condição, são fechadas as válvulas de alimentação de gás GLP para o leito e para o maçarico piloto e iniciada a alimentação de carvão no leito a uma taxa constante e intermitente até atingir-se uma temperatura em torno de 850 °C. Nessa condição são feitos os ajustes necessários na velocidade de fluidização e taxa de alimentação de forma a obter-se condição de operação em regime permanente numa temperatura em torno de 850 °C. A seguir, inicia-se a medição contínua com os analisadores de gases. São medidas as concentrações de CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e THC. Em sequência, inicia-se a alimentação de calcário no leito a uma taxa inicial constante, para relação Ca/S = 1. Assim que a condição de regime é atingida, espera-se aproximadamente 30 min para aumentar a taxa de alimentação de calcário que proporcione relação Ca/S de 2. Da mesma forma prossegue-se com aumentos da taxa de alimentação de calcário visando relação Ca/S=3 e depois Ca/S=4. Assim como na planta de bancada, as informações das concentrações, velocidades de fluidização e temperaturas do leito são lidas e armazenadas a cada segundo por um sistema de aquisição de dados devidamente instalado e configurado para a planta piloto.

Nas Figuras 3.5 e 3.6 apresenta-se uma vista geral da planta piloto em operação de combustão de carvão e um detalhe do módulo do leito com as paredes incandescentes, respectivamente.



Figura 3.5 – Vista da planta piloto em operação de combustão de carvão.

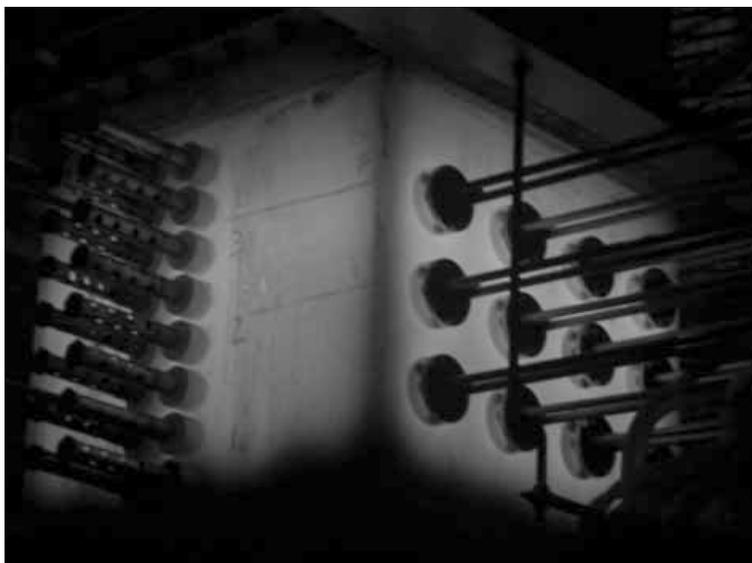


Figura 3.6 – Detalhe mostrando o módulo do leito incandescente.

A comparação das dimensões entre elementos da planta de bancada e da planta piloto é apresentada na Tabela 3.1. Observa-se que não há similaridade geométrica entre elas. Contudo as formas das seções dos leitos não produzem padrões de fluidização e de bolhas muito diferentes, e elas possuem uma área significativa em relação a reatores de bancada com diâmetros inferiores a 50 mm. Para aproximar a forma de seção circular da forma de seção quadrada, adota-se o conceito de diâmetro hidráulico ( $D_h$ ).

Tabela 3.1 – Comparação entre as plantas de bancada e piloto.

	bancada	piloto	Relação piloto/bancada
Seção	Circular	Quadrada	-
$D_h$ (m)	0,16	0,50	3,125
Altura (m)	0,45	3,00	6,67
Placa injetora	Torre curta	Torre	-
N° Injetores	13	39	3,00
Dex (mm)	14,89	23,5	1,58
Dr (mm)	2,00	3,00	1,50
Dc (mm)	6,93	12,50	1,80
$L_i$ (mm)	3,98	5,50	1,38

### 3.3 - Sistemas de alimentação de ar

Os sistemas de alimentação de ar de fluidização dos dois reatores são independentes. O sistema que alimenta a planta de bancada é composto por três sopradores centrífugos interligados em paralelo. A vazão de ar máxima suprida pelo soprador menor era 5,94 m<sup>3</sup>/min ou 850 mmca a 3500 rpm. Os outros dois sopradores são de 5,94 m<sup>3</sup>/min ou 1500 mmca e 90 m<sup>3</sup>/min ou 1550 mmca. Durante todos os testes da planta de bancada operou-se apenas com o segundo soprador. A vazão de ar é ajustada por uma válvula globo, diâmetro 50,8 mm e medida por placa de orifício de canto vivo, padrão ASME, diâmetro do orifício de 11,76 mm e espessura 2,5 mm, instalada num tubo de PVC de diâmetro interno 38,7 mm. Os pontos de tomada de pressão são do tipo *Corner Taps*. As pressões são medidas com manômetros de coluna de água e a temperatura do ar, antes da placa, era medida com um termopar tipo K. A vazão mássica de ar era determinada utilizando estes parâmetros de acordo com a norma ASME, com resultados aferidos com erros menores que 1%.

A linha de ar de fluidização da planta piloto é alimentada por um compressor de lóbulos SOMA disponibilizando uma vazão máxima de 20 m<sup>3</sup>/min ou 4000 mmca. A vazão de ar é ajustada por uma válvula borboleta, e medida por placa de orifício de canto vivo, padrão ASME, diâmetro do orifício de 45,75 mm e espessura 2,5 mm, instalada num tubo de PVC de diâmetro interno 97,0 mm. Pontos e forma de medida de pressão e temperatura são similares aos da planta de bancada.

### 3.4 - Sistema de aquecimento dos reatores

Para iniciar o processo de combustão de carvão é necessário que a massa do leito seja aquecida a pelo menos 400 °C, que é a temperatura de ignição do carvão CE-4800 utilizado neste trabalho. O aquecimento inicial do leito fluidizado pode ser realizado com ar quente (planta de bancada) ou pela queima de gás combustível (planta piloto).

O sistema de aquecimento do ar de fluidização da planta de bancada é formado por um aquecedor elétrico com potência de 10 kW que foi inteiramente projetado e

construído no NETeF. Ele é descrito em detalhes por Costa (2000). Todo o processo de aquecimento é monitorado no quadro de controle da planta de bancada. Na Figura 3.7 mostra-se o aquecedor de ar acoplado ao reator e as duas válvulas de esfera que permitem a operação do reator com ar quente ou frio. Com o aquecedor de ar atinge-se temperatura de 500 °C no leito, em aproximadamente cinco horas de operação.



Figura 3.7 – Vista do aquecedor de ar elétrico acoplado ao reator de bancada. Observa-se também as duas válvulas de esfera para a seleção de ar quente ou frio para a operação do reator.

Na planta piloto, o aquecimento do leito é feito com a queima de gás GLP. Este gás é injetado através de um maçarico piloto, localizado logo acima do nível máximo do leito, e também pela base do leito onde é misturado ao ar de fluidização através da placa de injetores. Tal mistura é feita por um conjunto de agulhas que ficam inseridas em alguns injetores de ar, conforme a Figura 3.8. As dimensões das agulhas ou tubos capilares são diâmetro externo de 1,3 mm, espessura de parede de 0,15 mm e comprimento de 154 mm. O tubo principal de entrada de gás GLP tem diâmetro externo de 21 mm e espessura de 2 mm, enquanto os tubos transversais de fixação das agulhas possuem diâmetro externo de 10 mm e espessura de 2 mm. Nas Figuras 3.9 e

3.10 mostra-se a placa de injetores de ar da planta piloto. No leito, temperaturas em torno de 700 °C são alcançadas em trinta minutos de operação.



Figura 3.8 – Câmara plena com 23 agulhas injetoras do gás GLP para aquecimento inicial do leito. Os tubos capilares são inseridos dentro das torres injetoras de ar de fluidização.

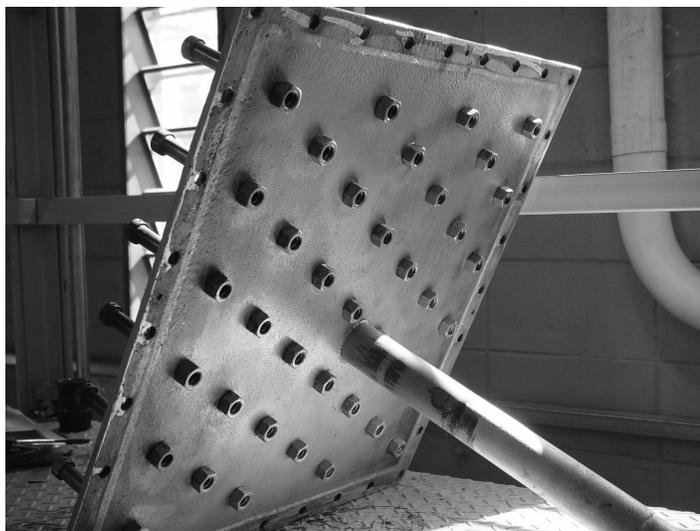


Figura 3.9 – Placa de injetores tipo torre. Note-se os orifícios de entrada de ar de 12,5 *mm* de diâmetro, onde as agulhas de gás GLP são inseridas e o tubo para drenagem do leito.

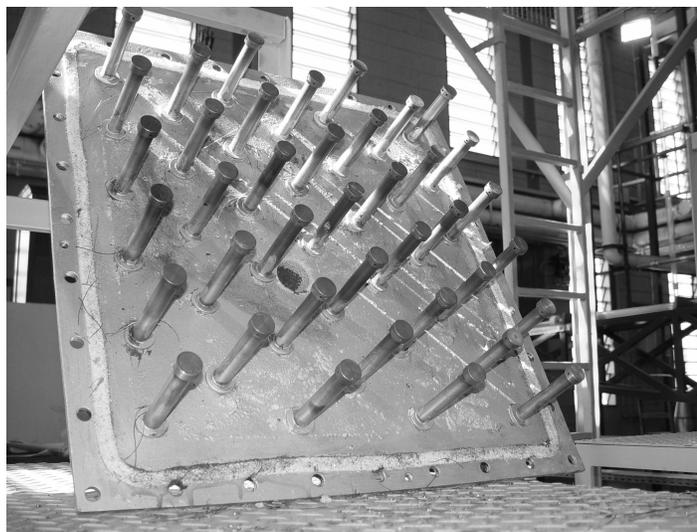


Figura 3.10 – Detalhe da placa de injetores tipo torre. Note-se o orifício de 42 mm de diâmetro no centro da placa, utilizado para esvaziamento do leito.

### 3.5 - Sistema de alimentação de sólidos

O carvão utilizado neste trabalho foi o CE-4800 que possui em média 40% C, 2.34% S, 25,6% de voláteis e 32 % de cinzas. O calcário utilizado foi o dolomítico de Ipeuna, tendo granulometria em torno de 500  $\mu\text{m}$  e composição média de 16,24% de Ca, e 9.9% de Mg. Na Tabela 3.2 apresenta-se a composição média desses materiais obtida pela Central Analítica do Instituto de Química da USP.

Tabela 3.2 – Composição média do carvão CE-4800 e calcário de Ipeuna. Dados fornecidos pela Central Analítica da USP.

Carvão:	S	C	H	O	N	
%	2.35	49.38	3.66	0.00	1.06	
Calcário	S	Ca	Mg	Al	Fe	Pb
%	0.80	16.24	9.90	1.15	1.06	30 ppm

Na planta de bancada o sistema de alimentação de carvão e de calcário é constituído por duas válvulas rotativas acopladas a um motor-reductor de corrente contínua. Em razão das pequenas quantidades alimentadas (cerca de 1 kg/h), foi

necessário construir as câmaras no próprio eixo e utilizar material de vedação na parede, invertendo o “design” convencional. Na figura 3.11 apresenta-se as válvulas desmontadas e na Figura 3.12 apresenta-se o desenho do eixo com câmaras, igual nas duas válvulas, e nas Figuras 3.13 e 3.14 mostra-se um desenho com as dimensões do conjunto e as válvulas montadas e acopladas nos respectivos silos de armazenamento de carvão e de calcário.



Figura 3.11 – Vista das válvulas rotativas desmontadas da planta de bancada.

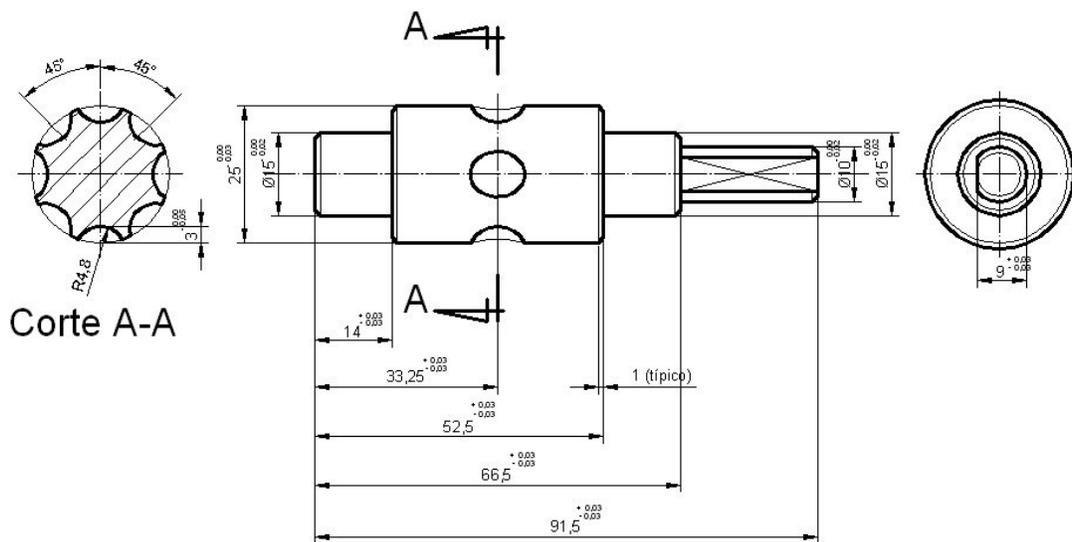


Figura 3.12 – Desenho do eixo das válvulas rotativas de carvão e de calcário da planta de bancada.

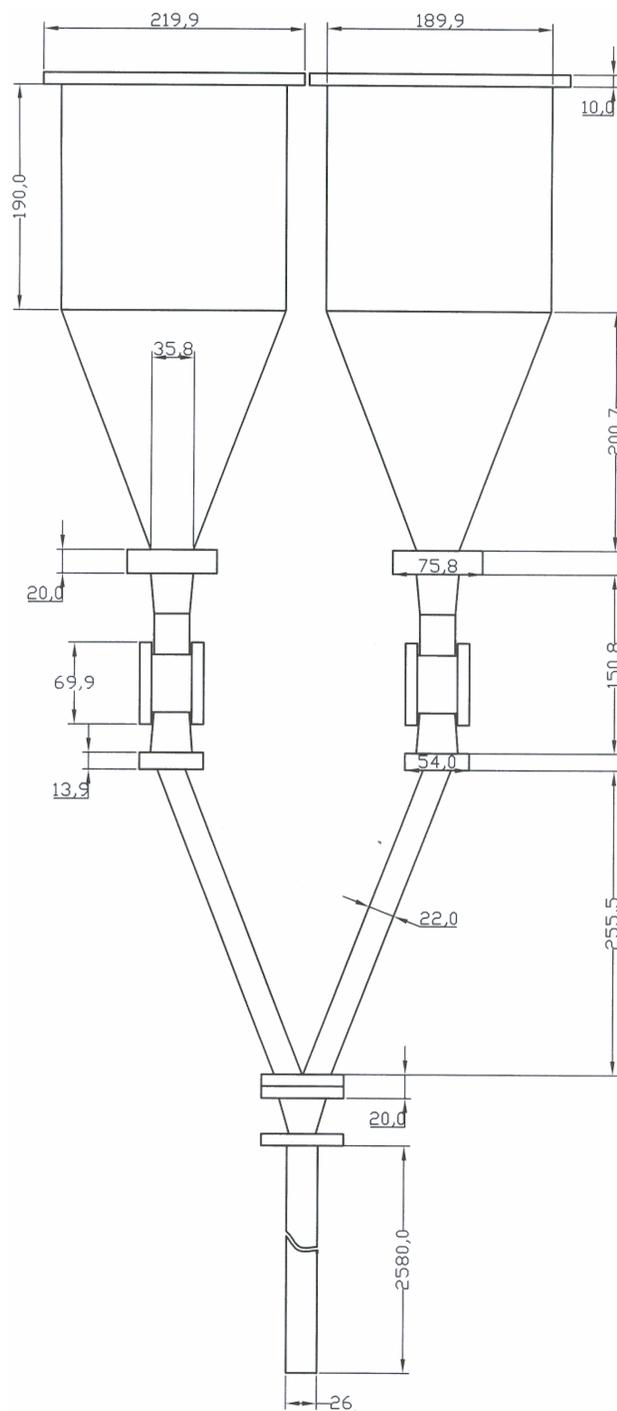


Figura 3.13 – Desenho com as dimensões dos silos, corpo das válvulas rotativas e tubulação até a entada do reator de bancada.



Figura 3.14 – válvulas montadas e acopladas nos respectivos silos de armazenamento de carvão e de calcário.

O controle de rotação de cada válvula é feito com uma fonte de corrente contínua de precisão cuja voltagem pode ser fixada entre 3 e 12 V. As curvas de calibração dessas válvulas são apresentadas nas Figuras 3.15 e 3.16. Nota-se a linearidade excelente deste dispositivo de alimentação. Nas figuras 3.17 e 3.18, apresenta-se a distribuição granulométrica do carvão e do calcário utilizados para calibração das válvulas rotativas e para os experimentos deste trabalho.

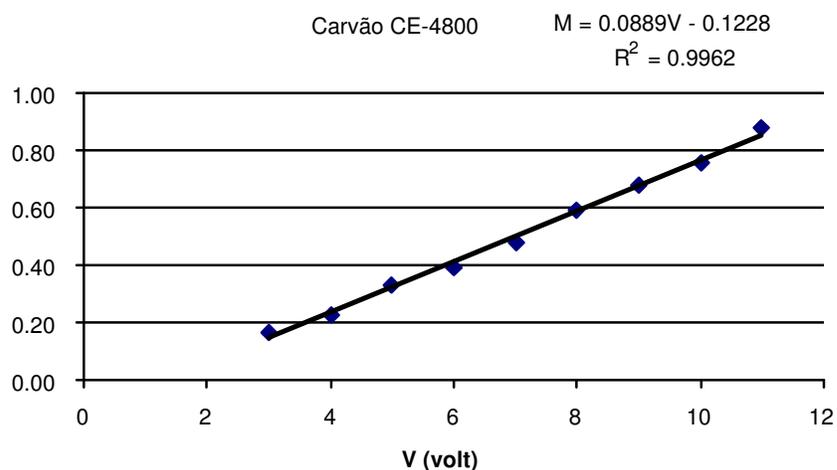


Figura 3.15 – Curva de calibração da válvula rotativa da planta de bancada com carvão CE-4800.

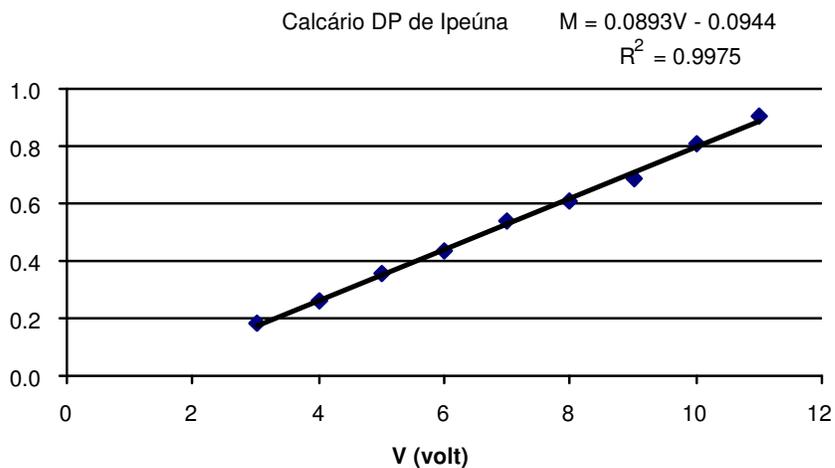


Figura 3.16 – Curva de calibração da válvula rotativa da planta de bancada com calcário DP de Ipeúna.

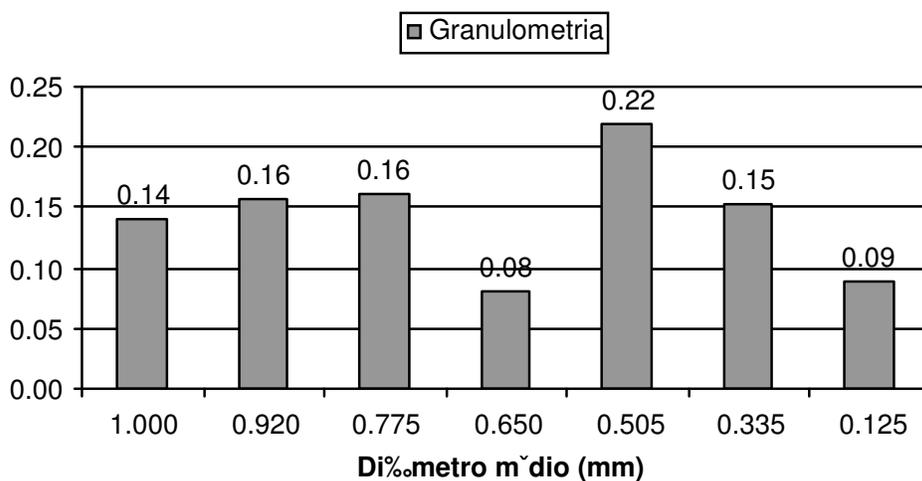


Figura 3.17 – Distribuição granulométrica do carvão CE-4800 utilizado neste trabalho. O diâmetro médio calculado corresponde a 0,445 mm (445 $\mu$ m).

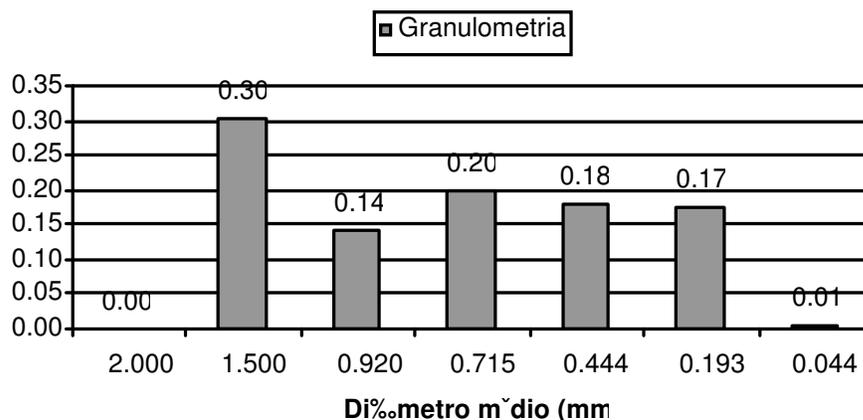


Figura 3.18 – Distribuição granulométrica do calcário DP de Ipeúna utilizado neste trabalho. O diâmetro médio calculado corresponde a 0,484 mm (484 $\mu$ m).

Na planta piloto o sistema de alimentação de carvão e de calcário é constituído por duas válvulas rotativas acopladas a um motor-reductor de corrente alternada. Na figura 3.19 apresenta-se as válvulas desmontadas. As paletatas das válvulas são de latão, que resiste bem à abrasão produzida pelo carvão e pelo calcário. Nota-se a diferença no volume das câmaras em cada válvula: a de carvão tem capacidade maior que a de calcário. Isto para facilitar a operação de alimentação de calcário que ocorre com descargas menores, principalmente em rotações baixas. Na Figura 3.20 mostra-se a válvula rotativa de calcário já instalada. Externamente não há diferença entre as duas válvulas rotativas. O controle de rotação de cada válvula é realizado com dois variadores de frequência que trabalham de forma independente. As frequências da corrente alternada que alimentam os motores podem ser fixadas entre 0 e 60 Hz. As curvas de calibração das válvulas são apresentadas nas Figuras 3.21 e 3.22. As distribuições granulométricas, tanto do carvão como do calcário, são semelhantes às dos materiais utilizados para calibração das válvulas rotativas da planta de bancada.



Figura 3.19 – Vista das válvulas rotativas desmontadas da planta piloto. As válvulas têm paletas de latão de espessuras diferentes: as paletas para carvão são menos espessas que as paletas para calcário.



Figura 3.20 – Vista da válvula rotativa de calcário instalada numa das linha de alimentação de sólidos da planta piloto.

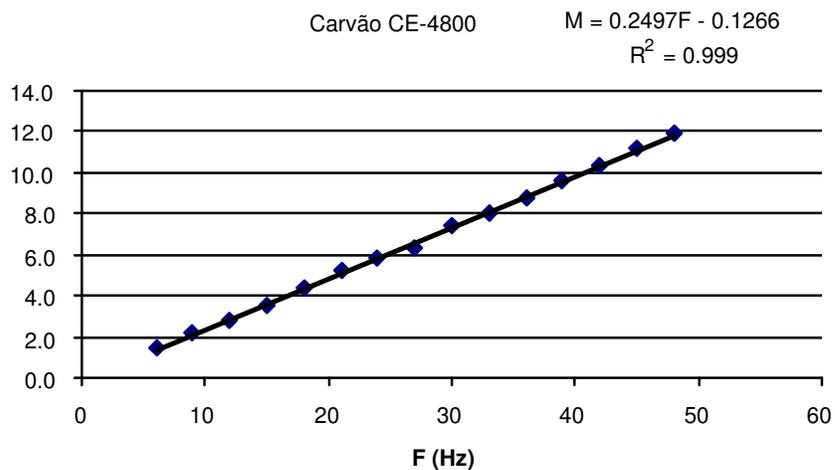


Figura 3.21 – Curva de calibração da válvula rotativa da planta piloto com carvão CE-4800.

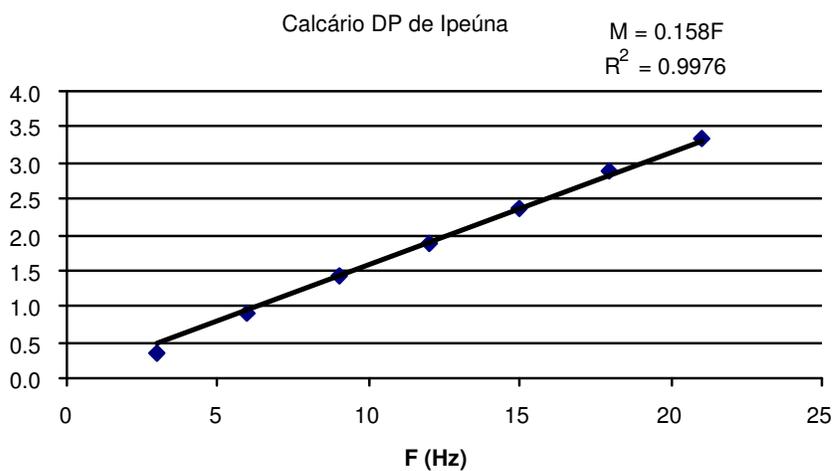


Figura 3.22 – Curva de calibração da válvula rotativa da planta piloto com calcário DP de Ipeúna.

### 3.6 - Sistema de medida de temperatura

Para medição da temperatura tanto no interior do leito como na linha ar, onde é utilizada para determinação de vazão, são utilizados termopares tipo K com fios de diâmetro 1,0 mm em ambas as plantas. Os fios são conectados a uma placa de aquisição de dados e as temperaturas lidas através de um programa específico.

Para medida da temperatura do leito na planta de bancada emprega-se dois termopares situados a 80 mm em relação à base da placa de injetores e defasados de 90° entre si, e distantes 10 mm da parede interna do reator. Os fios dos termopares são isolados eletricamente com cerâmicas de alumina de diâmetro externo 3 mm. Estas são ainda encamisadas com tubo de aço inoxidável 310 de diâmetro 5 mm. Isto para protegê-las de serem danificadas por choques mecânicos ou esforços elevados que poderiam causar erros de leitura.

Na planta piloto também são utilizados dois termopares para a medição da temperatura do leito. Os termopares estão situados a 100 mm e a 450 mm, respectivamente, em relação a cabeça dos injetores na base do leito e ambos estão a 100 mm da parede frontal do reator. Os fios são isolados com cerâmicas de molita e encapsulados em tubos de aço inoxidável 310 de com diâmetro externo de 10 mm e espessura de 2.25 mm.

Outros termopares tipo K são utilizados para controle do aquecedor de ar, na planta de bancada, aquecedores da linha de amostragem de gases e temperatura dos gases de entrada dos gases no filtro de mangas, na planta piloto. Nestes casos a indicação das respectivas temperaturas é feita com mostradores digitais instalados no quadro de controle.

### 3.7 - Sistema de medição de gases

Em ambos os reatores as concentrações dos gases são medidas com analisadores Horiba Enda 1400, modelos VIA-510 para medições de dióxido de enxofre  $\text{SO}_2$ , dióxido de carbono  $\text{CO}_2$  e monóxido de carbono  $\text{CO}$ , modelo FIA-510 para medições de hidrocarbonetos totais THC, modelo CLA-510 para medições de óxidos de nitrogênio  $\text{NO}_x$  e modelo MPA-510 para medições de gás oxigênio  $\text{O}_2$ . Cada analisador opera com vazões de gás de amostragem em torno de 0,5 l/min. Os analisadores de gás e suas respectivas unidades de amostragem são vistos na Figura 3.23.



Figura 3.23 – Vista dos analisadores de gás e suas respectivas unidades de amostragem.

O modelo VIA-510 utiliza o método de absorção de radiação no infravermelho não dispersivo com faixa estreita de comprimentos de onda específico para o gás de interesse. O modelo FIA-510 emprega o método de ionização de chama de hidrogênio com temperatura alta o suficiente para provocar a quebra e ionização das moléculas de hidrocarbonetos, gerando cátions de carbono. Isto gera uma corrente de íons que é proporcional a concentração de todos os hidrocarbonetos anteriormente presentes na amostra. O modelo CLA-510 opera segundo o princípio da quimioluminescência. Cada molécula de  $\text{NO}$  é transformada em  $\text{NO}_2$  através da ação de um catalisador. No próprio analisador existe um gerador de ozônio ( $\text{O}_3$ ). O ozônio reage com o  $\text{NO}$  produzindo

$\text{NO}_2$  excitado mais gás oxigênio. O  $\text{NO}_2$  excitado, por sua vez, retorna a  $\text{NO}_2$  estável liberando a energia de excitação na forma de luz. A emissão desta luz é proporcional à concentração de  $\text{NO}_x$  presente na amostra. O modelo MPA-510 utiliza o método de variação de pressão magnética, que ocorre quando um gás paramagnético, como  $\text{O}_2$ , atravessa uma região de campo magnético heterogêneo. A variação de pressão é proporcional à concentração de  $\text{O}_2$  na amostra. Todos os analisadores requerem um tempo de aquecimento de pelo menos uma hora para início de calibração e operação. Isto é necessário para que haja estabilização dos circuitos eletrônicos, vácuo e temperatura suficientes para ignição da chama de hidrogênio, e ozônio suficiente para a reação de  $\text{NO}_x$ . Todos eles são conectados eletricamente a um sistema de aquisição de dados que recebe e processa a cada décimo de segundo as leituras efetuadas pelos aparelhos.

Os analisadores têm precisão de 0,5% do fundo de escala e possuem de quatro a cinco faixas calibração. A calibração dos analisadores é efetuada com gases padrão primário contendo frações do gás de análise misturado com  $\text{N}_2$  equivalentes a 70 ou 80% do fundo de escala nas várias faixas de calibração. Todo procedimento de calibração é realizado sempre antes de cada série de experimentos.

A linha de amostragem de gases na planta de bancada é um pouco diferente daquela utilizada na planta piloto. Na Figura 3.24 apresenta-se um esquema da linha de amostragem de gases utilizada na planta de bancada. A sonda de amostragem de gases é construída em aço inoxidável 304, e seu ponto de fixação está localizado na saída do ciclone. O comprimento total da linha até a entrada do filtro do distribuidor é de 3,5 m. Do distribuidor até cada uma das quatro unidades de amostragem, o comprimento de cada mangueira de  $\varnothing 1/4''$  é o mesmo e igual a 2,0 m. Isto é necessário para que haja coincidência na leitura de todos os analisadores e os resultados possam ser comparados aproximadamente no mesmo instante. Adicionalmente regula-se a mesma vazão para cada analisador. Como não se tinha disponível um sistema de linha aquecida de dimensões compatíveis com a tubulação de descarga do reator, optou-se pela utilização de um filtro com corpo em inox localizado na saída do ciclone. O elemento filtrante presente em todos os filtros é a fibra de vidro não higroscópica, exceto o da caixa

quente da planta piloto que possui elemento filtrante de malha de aço inoxidável. Os elementos filtrantes e a linha de amostragem eram substituídos e/ou limpos todas as vezes que era observado algum sinal de entupimento na linha de amostragem, como por exemplo, encolhimento da garrafa tipo “pet” utilizada, ou aumento da concentração de  $O_2$  com decréscimo da concentração de  $CO_2$ .

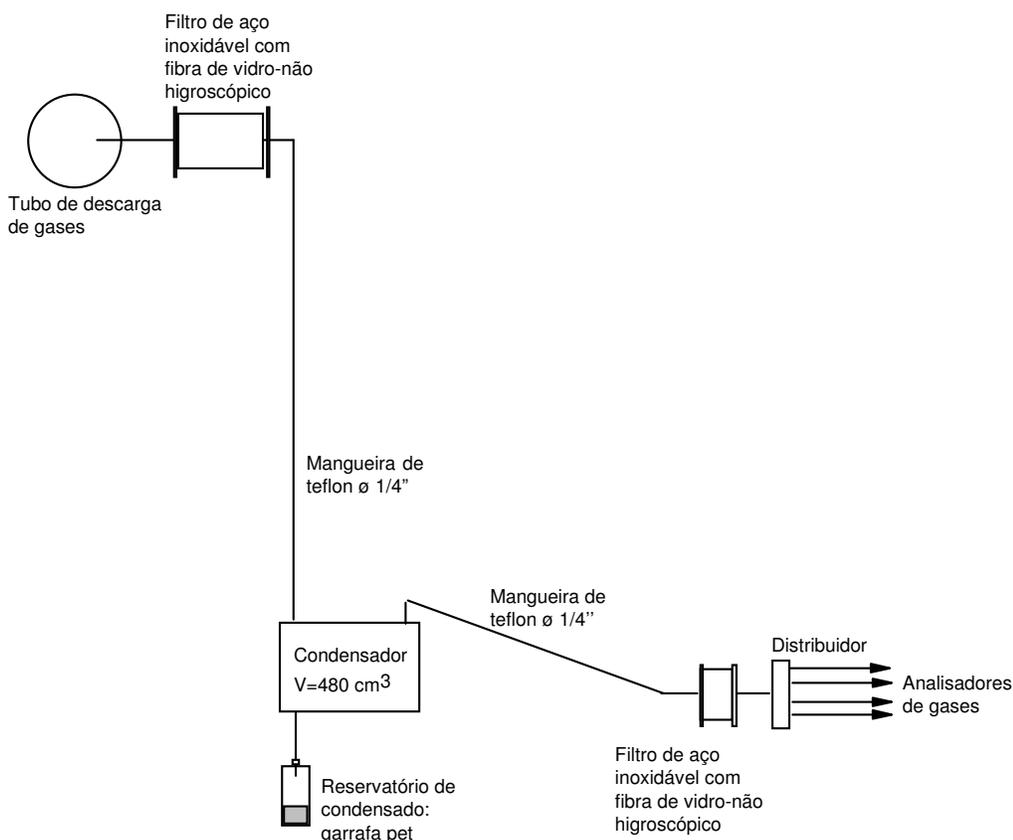


Figura 3.24 – Esquema da linha de amostragem de gases empregada na planta de bancada. A linha é basicamente toda de mangueira teflon  $\varnothing$  1/4” e comprimento total em torno de 3,5 m até a entrada do filtro do distribuidor.

Da picada até a entrada da caixa quente aquecida a 120 °C, cerca de 1,0 m, a linha é um tubo de aço inoxidável  $\varnothing_{ext}$  7/8” e  $\varnothing_{int}$  5/8”. Da saída da caixa quente até a entrada do condensador, cerca de 10,0 m, a linha é toda aquecida a 120 °C. Da saída do

condensador até a entrada do filtro com distribuidor a linha é com mangueira de teflon de  $\varnothing 1/4''$  com cerca de 8 m de comprimento. Este filtro com distribuidor é o mesmo utilizado na planta de bancada.

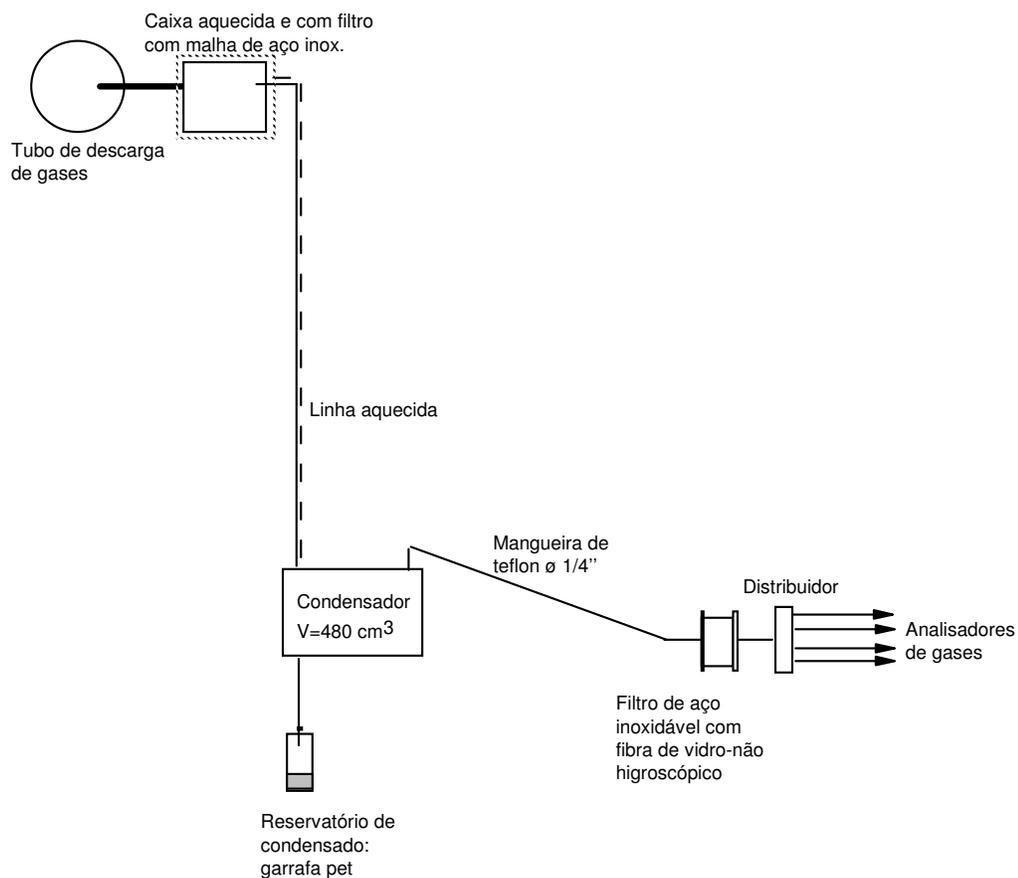


Figura 3.25 – Esquema da linha de amostragem de gases empregada na planta piloto. A linha possui um comprimento total de 18 m até a entrada do filtro com distribuidor.



Figura 3.26 – Vista da caixa quente e de parte da linha de amostragem de gases utilizada na planta piloto.

### 3.8 - Sistema de aquisição de dados

A aquisição de dados das concentrações de gases e temperaturas do leito e do ar, na tubulação antes da placa de orifício, é realizada por um computador PC com processador AMD Duron 1,1 GHz e sistema operacional Windows 98, Disco com 37.2 GB, memória RAM de 120 MB equipado com placa de aquisição PCI-6023E com módulo SCXI-1303 e programa LabView, versão 6.1, da *National Instruments Corp.* As medidas de temperaturas e concentrações de gases nos analisadores são enviadas ao computador que as adquire na frequência de 10 Hz e indica valores médios com frequência de 1 Hz. As pressões dos manômetros de coluna de água são registradas manualmente e inseridas no computador, sendo a leitura revista a cada cinco minutos e atualizada quando necessário. Desta forma, através de um programa específico, o computador apresenta as velocidades de fluidização, concentrações e temperaturas.

### 3.9 - Planejamento de experimentos

Uma planejamento de testes inicial foi elaborado visando-se ter dois níveis da variável tempo de residência e uma réplica para cada teste nos dois reatores. Entretanto, devido à dificuldades experimentais inerentes a cada reator, os experimentos seguiram o descrito nas Tabelas 3.3 e 3.4

Tabela 3.3 – Valor das variáveis e total de testes nas plantas de bancada e piloto seguindo-se um planejamento fatorial em dois níveis.

	Planta de bancada	Planta piloto	
Variável	Níveis	Níveis	
U	U1 e U2	U1	
T	T1 e T2	T1 e T2	
dc	500 $\mu\text{m}$	500 $\mu\text{m}$	
Ca/S	0; 2; 3; 4; 5	0; 1; 2; 3; 4	
Altura do leito	$H_{mf1}$ e $H_{mf2}$	$H_{mf3}$ e $H_{mf4}$	
Replicas	0	1	Total de testes válidos
Testes por reator	10	15	25

Tabela 3.4 – Representação das variáveis nos 25 testes válidos.

Planta de bancada	Planta de bancada	Planta piloto	Planta piloto
Ca/S = 0; 2; 3; 4; 5	Ca/S = 0; 2; 3; 4; 5	Ca/S = 0; 1; 2; 3; 4	Ca/S = 0; 1; 2; 3; 4
U1=0,60 m/s	U2=0,70 m/s	U1=0,60 m/s	U1=0,60 m/s
T1=890 °C	T2=840 °C	T1=890 °C	T1=845 °C
dp 1=447 $\mu\text{m}$	dp 1=447 $\mu\text{m}$	dp 1=447 $\mu\text{m}$	dp 1=447 $\mu\text{m}$
$H_{mf1}$ =0,12 m	$H_{mf2}$ =0,25 m	$H_{mf3}$ =0,16 m	$H_{mf4}$ =0,34 m
0 réplica	0 réplica	0 réplica	1 réplica

Em função da representação descrita na Tabela 3.4, o método estatístico utilizado foi o de comparação de dois tratamentos (planta de bancada e piloto) com fatores em dois níveis para cada condição do fator Ca/S, buscando-se respostas (concentrações de gases, eficiência de combustão, eficiência de absorção, conversão e coeficiente global de taxa de reação de carbono fixo (apenas para  $Ca/S = 0$ ), conversão e coeficiente global de taxa de reação de calcário) em função da influência de cada fator e tratamento e também de efeitos de interação entre fatores e entre tratamentos.

### **3.10 - Procedimento experimental**

O procedimento experimental para partida e operação das plantas de bancada e piloto, obedeceu a sequência descrita a seguir:

#### **Procedimento experimental comum aos dois reatores**

Ligar os analisadores de gás e aguardar por pelo menos uma hora antes de iniciar o processo de calibração e/ou medição;

Ligar o computador e verificar as conexões dos fios no módulo de aquisição de dados e nos analisadores de gás, e mangueiras para medida de pressão na placa de orifício e no corpo do reator;

Verificar todas as conexões de alimentação e amostragem de gases. Todas deverão estar bem fixadas e sem vazamentos;

Inspecionar a parte interna do reator para retirada de qualquer objeto na placa de injetores;

Fechar todas as válvulas de descarga de particulado do reator e fazer a carga inicial do leito com areia de 500  $\mu\text{m}$ , no caso do leito de bancada, com massa de 3 kg, e para o reator piloto, 70 kg.

Ligar o sistema de alimentação de ar por 5 minutos, para drenar eventuais impurezas de dentro do reator;

Abrir a válvula de controle de nível do leito e iniciar processo de aquecimento inicial do leito;

Ligar o sistema de aquisição de dados e verificar seu funcionamento correto;

#### **No caso da planta de bancada**

Colocar isolamento térmico em todo o corpo do reator e ajustar a velocidade de fluidização para 0,20 m/s com ar na temperatura ambiente;

Ligar o aquecedor elétrico de ar e efetuar taxa de aquecimento de 100 °C por hora, com ajuste até o máximo de 900 °C no setpoint de controle do aquecedor;

Quando a temperatura do leito atingir 500 °C, iniciar a alimentação de carvão por 2 min, com vazão em torno de 60% da vazão prevista para regime em operação permanente. Parar a alimentação de carvão por 2 min. Iniciar novamente a alimentação de carvão por 2 min. Repetir esta operação até que a temperatura do leito alcance cerca de 900°C. À medida que a temperatura do leito aumenta, regular a velocidade de fluidização para 0,60 m/s.

Retirar o isolamento térmico da região do freeboard do reator e aumentar a vazão de carvão até que a temperatura se estabilize em 900 °C.

Desligar o aquecedor de elétrico de ar e, logo em seguida, abrir a válvula de entrada de ar frio e fechar a válvula de entrada de ar para o aquecedor. Elevar a vazão de carvão até que a temperatura se estabilize em 850 °C.

**No caso da planta piloto**

Ligar o exaustor do filtro de mangas e ajustar frequência de jatos de ar comprimido para 0,25 Hz, ou 4 jatos por minuto com duração de 1 s cada jato para limpeza das mangas.

Fechar a válvula inferior do depósito do filtro de mangas e abrir as válvulas dos três cilindros de gás GLP, regular a pressão para 2 kgf/cm<sup>2</sup> a jusante da válvula reguladora e abrir a válvula de alimentação de gás GLP para o reator;

Colocar o leito no estado de fluidização a 0,30 m/s por 5 min para purgar qualquer resquício de gás GLP, evitando-se assim risco de explosão;

Reduzir a velocidade para próximo à de fluidização mínima e ligar os disjuntores energização da usina de alta tensão do maçarico piloto e motores de alimentação de carvão e calcário;

Abrir a válvula de alimentação de ar para o maçarico piloto mantendo um  $\Delta P$  de 90 mmCa na placa de orifício. Acionar o botão da usina para que haja centelha no maçarico. Dois segundos depois, abrir lentamente a válvula de alimentação de gás GLP para o maçarico. Imediatamente uma chama deverá ser vista pelo visor localizado no segundo módulo do reator. Se a chama não aparecer depois de cinco segundos, desacionar o botão da usina e fechar imediatamente a linha de gás para o maçarico. Recolocar o leito no estado de fluidização a 0,30 m/s por 5 min para purgar qualquer resquício de gás GLP, evitando-se risco de explosão; Reduzir a velocidade para próximo à de fluidização mínima, e tentar nova ignição da chama piloto. Se a chama não acender, verificar todo o sistema de alimentação de gás e parte elétrica.

Aparecendo chama, esta deverá ser regulada para uma coloração amarelada, ou seja rica. Em seguida abrir a portinhola de inspeção localizada no último módulo do reator e abrir lentamente a válvula de alimentação de gás GLP para a base do leito. Cinco segundos depois um som característico de expansão abrupta de gás deverá ser ouvido e uma pequena “língua” de fogo sairá rapidamente pela portinhola indicando o

acendimento da chama do leito. Se não houver chama do leito, fechar a válvula de alimentação de gás para a base do leito e verificar a linha e os cilindros de gás GLP.

Aparecendo a chama do leito, esta deverá ser ajustada para colaração amarela, rica, com velocidade de fluidização elevada para 0,30 m/s. Após isso, a temperatura do leito deverá subir rapidamente, e em cerca de 30 min deverá atingir 700 °C.

Com o leito em torno de 700°C, iniciar a alimentação de carvão com vazão em torno de 75% da vazão de regime. Logo em seguida fechar a válvula de alimentação de gás para o reator. Nesse instante a temperatura do leito começará a cair até aproximadamente 600 °C voltando a subir até uns 800 °C. Nesse ponto, elevar a vazão de carvão e ajustar a velocidade de fluidização para 0,60 m/s até que a temperatura de regime alcance cerca de 870 °C. Se após o corte do gás para o reator, a temperatura do leito cair abaixo dos 400 °C e não voltar a subir, pode haver problemas com o sistema de alimentação de carvão do reator e/ou problema de aglomeração no leito. Ambas as possibilidades deverão ser verificadas;

Fechar as válvulas da linha e dos cilindros de gás GLP.

### **Procedimento experimental comum aos dois reatores**

Com reator queimando carvão na condição de regime permanente, iniciar a amostragem e medição de gases com os analisadores já calibrados devidamente;

Iniciar a alimentação de calcário com vazão correspondente à relação Ca/S desejada para o teste. Aguardar o estabelecimento da condição de regime permanente, armazenar os resultados e ajustar nova relação Ca/S.

Na planta de bancada, a cada 15 min aproximadamente, limpar a sonda e o filtro primário da linha de amostragem de gases com ar comprimido e substituir o elemento filtrante em caso de obstrução por fuligem e umidade. Na planta piloto, a cada 30 min limpar a sonda e o filtro primário da caixa quente com ar comprimido.

Durante todo o teste verificar possíveis entupimentos e conseqüente infiltração de ar na linha de amostragem de gases. Este problema influencia os resultados das medidas de gases.

Esvaziar os reservatórios de cinzas a cada hora e os de material elutriado a cada 15 minutos.

Concluídos os testes, parar as vazões de carvão e de calcário e aguardar até que a temperatura do leito caia para 500 °C. Manter a velocidade de fluidização em torno 0,30 m/s até que o leito atinja 200 °C.

Desligar ventiladores de ar, filtro de mangas, computador e aquisição de dados.

Fechar as válvulas dos cilindros de nitrogênio, que alimenta o analisador de O<sub>2</sub>, e de hidrogênio que alimenta o analisador de THC.

Desconectar a mangueira de teflon da entrada do filtro com distribuidor e deixar os analisadores puxando ar ambiente por pelo menos 5 horas para purga de resíduos de gases das células dos analisadores.

Desligar os analisadores de gases.

Abrir o reator para verificação e limpeza.

### 3.11 - Problemas e soluções

Durante a realização dos testes preliminares ocorreram os seguintes imprevistos:

#### **Planta de bancada**

Aglomerção de carvão e calcário nas válvulas.

A válvula rotativa de alimentação de carvão e calcário foi inicialmente projetada sendo um eixo de aço inox 304 com oito cavidades com cantos a 90° que favorecia o empacotamento do material particulado de tal maneira que o mesmo não era totalmente descarregado da cavidade. Isto representava variações de vazão mássica e diminuição considerável da capacidade de alimentação da válvula. Esse problema foi resolvido com a mudança da geometria das câmaras para a forma semiesférica. Essa geometria possui ângulo de saída favorável que não permite a retenção de material sólido. Entretanto, ainda houve alguns empacotamentos de calcário nas câmaras. Isto deve ter ocorrido devido à umidade excessiva de alguma parte desse material. Para evitar ao máximo a possibilidade desse problema influenciar os resultados, o duto de alimentação de calcário foi constantemente monitorado visualmente e sempre que necessário aplicava-se pancadas leves com chave de fenda no corpo da válvula para eliminar qualquer empacotamento de calcário. Com o carvão este problema não ocorreu.

Falha nos motores de acionamento das válvulas rotativas.

Inicialmente foram utilizados motores de passo para acionamento das válvulas rotativas. Nas faixas de rotações de 0,20 a 1 Hz ocorria travamento das válvulas por torque insuficiente dos motores de passo. A solução foi a troca destes motores de passo por sistemas motor-reductor iguais aos empregados em limpadores de parabrisa de automóveis. Esses motores são de corrente contínua e operam com tensão de 3 a 12 volts com torque suficiente para impedir qualquer travamento das válvulas rotativas.

Altura baixa de entrada de carvão e calcário.

Nos primeiros testes a altura de queda do carvão da saída da válvula até a entrada no reator era de 0,5 m e o carvão ainda era limitado pelo tubo de alimentação que fazia duas curvas de 45 ° antes de cair no leito. Adicionalmente parte do tubo de alimentação ficava dentro do reator e era aquecido a temperaturas igual ou superior à

temperatura de ignição do carvão. Tal fato fazia parte do carvão gaseificar e liberar voláteis e alcatrão ainda dentro do tubo de alimentação causando seu entupimento devido à aglutinação do carvão causada pelo alcatrão em forma de óleo. A solução foi a retirada desse tubo de dentro do reator, substituição do ponto de entrada por outro que permite uma entrada praticamente vertical do carvão no reator e elevação da altura de queda desse material para se ter energia cinética maior das partículas na entrada do reator.

Problemas de aglomeração de algumas partes do leito.

A aglomeração de material particulado, carvão calcário e cinzas, ocorre principalmente no início da alimentação de carvão para o leito do reator que está relativamente frio, cerca de 450 – 500 °C. Nesta faixa de temperatura, se a taxa de alimentação de carvão for alta ocorre problema semelhante àquele do tubo de alimentação dentro do leito, ou seja gaseificação e molha das partículas com alcatrão oleoso. Por isso o processo inicial de alimentação de carvão deve ser intermitente e com taxa de alimentação em torno de 30 a 40% da prevista para operação em regime permanente na planta de bancada. Desta forma resolveu-se o problema de aglomeração no reator.

Entupimento da linha de amostragem de gases.

Este problema era frequente e na época não pôde ser eliminado completamente devido à limitação de tempo para a conclusão deste trabalho. O ponto de picada da sonda de amostragem encontra-se logo na saída do ciclone. Embora o ciclone retenha a maior parte do particulado elutriado, ainda assim uma quantidade considerável de material particulado escapa pela saída do ciclone. Parte desse material é formado por partículas finas carvão não queimado mas em estado de gaseificação e molhadas por alcatrão oleoso. Muitas dessas partículas são sugadas para dentro da sonda e aderem na sua parede interna até obstruir completamente a sonda. Além disso as partículas que passam pela sonda vão ficando retidas no filtro primário e juntamente com a umidade gerada na combustão chegam também a obstruir o filtro. A solução paliativa para este problema foi a adoção de procedimento de limpeza da sonda com ar comprimido a cada 10 ou 15 min e troca do filtro quando saturado de partículas e umidade.

Infiltração de ar na linha de amostragem de gases.

Este problema era consequência do entupimento da sonda e também de vazamentos ou folgas na conexões das mangueiras de teflon e flanges dos filtros e do condensador de umidade. A solução para minimizar a infiltração de ar foi a aplicação de abraçadeiras em todas as conexões de mangueiras de teflon e silicone e teste de estanqueidade dos filtros e condensador.

Entupimento do dreno do leito.

Nos testes iniciais, o tubo de drenagem do leito trabalhava conectado a um reservatório de aço inoxidável fechado completamente. Assim quando ocorria o entupimento deste tubo, de diâmetro interno 10 mm, não se tinha indicação imediata se tal fato ocorria. Somente depois de horas de operação é que se percebia o problema, pois parte da região do freeboard que deveria ficar escura apresentava-se incandescente. O nível do leito não aumentava de forma linear devido ao aumento da taxa de eletruição que era proporcional à diminuição da TDH do reator. A solução para este problema foi a retirada do reservatório de aço inoxidável fechado e utilização de um reservatório aberto. Assim a drenagem de cinzas do leito era constatemente monitorada visualmente e quando a drenagem era interrompida, prontamente se injetava ar comprimido no tubo de drenagem e o processo voltava ao normal. Na verdade este procedimento de injeção de ar comprimido precisou ser realizado apenas 3 vezes em todos os testes.

Entupimento da linha de alimentação de carvão e calcário.

Este problema ocorreu devido ao aquecimento elevado da tampa cônica do reator onde está a entrada de carvão e calcário para o reator. Esse aquecimento era consequência da elevação do nível do leito por entupimento do dreno e também era causado pela combustão de voláteis e produtos de gaseificação quando se tentava operar o reator com taxa máxima de alimentação de carvão sem alterar a taxa de alimentação de ar. Com a tampa cônica em temperatura acima ou próxima da combustão do carvão alimentado, este sofria o processo de molhagem por alcatrão oleoso e aderida na parede

do tubo de alimentação até obstruí-lo completamente. Quando isto ocorria a temperatura do leito caía rapidamente e o teste era encerrado.

### **Planta piloto**

Na planta piloto ocorreram problemas no acendimento do leito fluidizado por diminuição da vazão e da pressão de injeção de gás GLP. A princípio creditou-se esse problema ao resfriamento do cilindro de gás. Aparecia uma camada fina de gelo na parede externa do cilindro de gás que restringia a taxa de transferência de calor necessária à vaporização do gás liquefeito. Para contornar esse problema instalou-se três cilindros conectados em paralelo de modo que a vazão de gás ficou dividida por três, diminuindo assim a taxa de resfriamento por cilindro e impedindo a formação de qualquer camada de gelo.

A partida seguinte do reator piloto ocorreu sem problemas. Operou-se com três cilindros novos cheios de gás GLP. Entretanto, na partida seguinte, com os cilindros já com a metade da carga, começou-se a ter dificuldades no acendimento e aquecimento do reator. Teve-se duas explosões violentas dentro dele no momento de acendimento do maçarico. A estrutura do reator resistiu graças à sua descarga livre para a atmosfera e portinhola de inspeção aberta. O dano à equipe foi apenas emocional, pois ficou-se com receio de tentar nova partida. Decidiu-se então abortar os testes e averiguar com detalhe o que estava acontecendo.

Dois dias depois, iniciou-se uma inspeção em todo o reator. Observou-se que havia pressão baixa de gás no maçarico, nas agulhas dos injetores na base do leito e falhas de contato elétrico na vela de ignição. Esta última causava falha na ignição e não acendimento do maçarico levando a um acúmulo de gás em todo o volume do reator. Quando a centelha surgia havia uma explosão violenta dentro do reator. Também foi observado que a válvula reguladora de pressão da linha de gás não estava boa e que havia entupimento de algumas agulhas injetoras de gás na base do leito. Decidiu-se então substituir a válvula reguladora de pressão por outra nova com maior vazão e pressão mais adequadas. Desmontou-se a parte de baixo do reator para desobstrução das agulhas injetoras de gás. Elas estavam obstruídas por partículas de areia que de alguma

forma penetraram pelos injetores e foram se alojar no plenum e nos tubos de distribuição de gás para as agulhas. Além das agulhas, eventualmente alguns injetores também foram obstruídos causando deficiência de fluidização localizada. Isto pode ter contribuído para a nucleação de aglomerados de carvão que foram crescendo até desfluidizar completamente o leito durante um teste de operação do reator. A deficiência de fluidização também ocorreu por vazamento de ar na entrada do plenum. Este vazamento foi consequência do aquecimento excessivo, por irradiação, da junção do tubo de pvc com o tubo de aço inoxidável da entrada do plenum. Este problema foi resolvido aplicando-se cola de silicone e isolamento térmico sobre a junção.

Também refez-se a conexão elétrica da vela de ignição. Após estas medidas, as partidas do reator passaram a ser “suaves” sem haver qualquer explosão. Todavia o controle das vazões de ar/gás para o reator continuava sendo manual e muito dependente da intuição do operador. Adicionalmente, ainda ocorria falha elétrica aleatória dificultando o acendimento inicial do maçarico piloto. Desta forma, está prevista a instalação de um maçarico piloto novo com controle automático de acendimento. Isto facilitará muito as futuras partidas do reator piloto.

Outro problema foi o desgaste acentuado das paletas de borrachas das válvulas rotativas de alimentação de carvão e calcário para o reator. Substituiu-se o material de borracha por latão e, até o final dos experimentos não se observou desgaste significativo nas paletas de latão.

Ainda no sistema de alimentação de calcário, ocorreram problemas de empacotamento desse material na entrada da válvula. Mesmo tendo granulometria média de 500  $\mu\text{m}$ , este material ainda encontrava-se relativamente úmido. Para evitar-se novo empacotamento, secou-se ao Sol todo o calcário que seria armazenado no silo. Também repeneirava-se todo o calcário e todo o carvão na entrada dos respectivos silos para evitar-se entupimento e/ou danos às válvulas rotativas.

Durante a operação contínua do reator havia um acúmulo de material particulado de granulometria inferior a 100  $\mu\text{m}$  imediatamente após a curva do duto de descarga de

gases em trecho horizontal, resultante das cinzas e finos do carvão alimentado. Esse material se depositava a partir da saída da primeira curva do duto de exaustão do reator indo até a próxima curva. Assim esse material ia acumulando-se em todo o trecho horizontal do tubo de exaustão chegando a atingir a metade do seu diâmetro e obstruindo completamente a sonda de amostragem de gases. A solução encontrada foi a instalação de um separador inercial de particulado. Este separador foi posicionado no primeiro trecho horizontal do tubo de descarga do reator. Assim, o particulado retido no separador seguia por ação da gravidade até um reservatório apropriado. Adicionalmente, estabeleceu-se o procedimento de limpeza da sonda de amostragem e filtro da caixa quente a cada hora com ar comprimido. Assim não ocorreram mais entupimentos da linha de amostragem de gases.

Ocorreram também problemas de agomeração em algumas partes do leito. Estes problemas foram devidos possivelmente a duas causas: entupimento de alguns injetores de ar na base do leito e/ou aglutinação de partículas de carvão “amolecidas” ou molhadas com alcatrão oleoso durante o processo inicial de aquecimento do leito. O carvão utilizado é betuminoso e quando aquecido libera um óleo preto denominado alcatrão. Esse óleo “molha” o carvão fazendo as partículas se aglutinarem. Nos testes onde detectou-se partes aglomeradas do leito, na passagem do aquecimento do leito de GLP para carvão, feita a uma temperatura de 600°C, a taxa de alimentação de carvão era contínua e representava cerca de 10 kg/h.

Finalmente ainda ocorreu o problema de corrosão e quebra do termopar que monitorava a temperatura do leito. Nos dois reatores os termopares ficavam em contato com o ambiente agressivo do leito tanto pela abrasão das partículas quanto pela atmosfera de combustão. A solução foi utilizar dois termopares inseridos dentro do leito e mais dois de reserva que ficavam fora do reator. Quando o termopar principal falhava, trocava-se apenas sua conexão elétrica pela do outro que já se encontrava dentro do leito. Quando este último falhava, a operação de combustão era interrompida para a troca dos dois termopares.