

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Análise do sistema de alimentação de ar de combustão de uma caldeira de queima frontal  
multicombustível

Por

Paulo Roberto Bastos Bueno

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, 21 de dezembro de 2012

ANÁLISE DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE AR DE COMBUSTÃO DE UMA  
CALDEIRA DE QUEIMA FRONTAL MULTICOMBUSTÍVEL

Por

Paulo Roberto Bastos Bueno  
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da  
Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos  
requisitos necessários para obtenção do Título de:

Mestre em Engenharia

Área de Energia

Orientadora: Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi

Aprovada por:

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider,	PROMEC/UFRGS
Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira,	PROMEC/UFRGS
Prof. Dr. Michel José Anzanello,	PPGEP/UFRGS
Prof. Dr. Volnei Borges,	PROMEC/UFRGS

Prof. Francis H. R. Franca, Ph.D  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 21 de dezembro de 2012

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão às pessoas que me deram ajuda e apoio durante a realização deste trabalho. Seria impossível mencionar todas. Todavia quero lembrar especialmente a:

Professor Dr. Paulo Smith Schneider pela amizade, conselhos e apoio em momentos decisivos durante os três anos da realização deste trabalho.

Aos engenheiros Marco Antonio Guedes Vasconcellos e Pedro Luis Invernici, meus líderes imediatos na Braskem, pelo apoio e compreensão.

Ao engenheiro Fernando Alberto Gonçalves Siqueira e estagiário Jeferson Luis Both, colegas de trabalho, pelo companheirismo e auxílio em momentos decisivos no desenvolvimento dos experimentos deste trabalho.

Operador de Utilidades Marcel R. Muller Schwanz e técnico de instrumentação Luiz Augusto Longaray, colegas de trabalho, pelo apoio na montagem e auxílio nas seções de testes.

Aos colegas do grupo de estudos térmicos e energéticos.

Aos colegas da Braskem pelo incentivo e apoio na hora certa.

Professora Thamy Cristina Hayashi, pela orientação, sabedoria, incentivo, amizade e incansável apoio durante todo desenvolvimento desta pesquisa.

A Luciani Pannebecker Ventura Bueno, esposa e companheira, por ter sido, inúmeras vezes, pai e mãe do Pedro Henrique a quem também agradeço por me permitirem tempo para realização deste trabalho.

## RESUMO

Neste trabalho, o comportamento do escoamento de ar nos dutos de suprimento para os queimadores de uma caldeira multicomcombustível de alta potência (categoria A- NR-13) de queima frontal é investigado experimentalmente.

Sondas de Pitot foram instaladas em diversas regiões ao longo do escoamento nos dutos de ar, para medição das pressões estática e de estagnação, de forma a caracterizar o campo de velocidade na caixa de ar. Medições do campo de pressão foram realizadas para várias condições operacionais e configuração de abertura das entradas de ar dos queimadores.

Através da análise dos dados verificou-se que a velocidade do ar na alimentação dos queimadores é influenciada pela condição de queimador aceso ou apagado e também pelas configurações de combustíveis e pela vazão total, que é ditada pela carga da caldeira. Também foram feitas medidas das pressões estáticas nas câmaras de ar primário e secundário de cada queimador. Os resultados mostraram que estas pressões são menores nas linhas de queimadores inferiores aumentando na direção dos queimadores superiores. A comparação dos resultados experimentais obtidos com a caldeira apagada (sem geração de vapor) e com os dados dos experimentos realizados com caldeira acesa, não apresentaram discrepância qualitativa e nem quantitativa relevante, possibilitando estudar o comportamento do escoamento a frio. Os resultados experimentais também indicaram a existência de uma região em que o escoamento ascendente tem maior velocidade, pelo lado direito do plano médio vertical da caixa de ar.

Como parte do objetivo desenvolve-se uma aplicação com as técnicas de planejamento fatorial  $2^3$  e análise da variância nas principais variáveis de controle do ar de alimentação para os queimadores da caldeira. Os resultados calculados através do modelo obtido pelo planejamento fatorial a partir dos testes com caldeira desligada apresentam boa concordância com os resultados experimentais tanto para operação com caldeira desligada quanto ligada quando todos os queimadores estão abertos. Os experimentos revelaram que os modelos obtidos a partir da análise fatorial podem ser utilizados para estimar o campo de velocidades na seção vertical da caixa de ar.

Palavras chaves: Caldeira, planejamento fatorial  $2^3$ , análise de variância.

## ABSTRACT

Combustion air flow in the windbox of an industrial multifuel front wall boiler was experimentally investigated.

The velocity field was mapped by measuring the static and stagnation pressure fields along the flow by means of Pitot tubes. Experimental tests were conducted for a range of operating conditions and a set of configurations involving dumped and open burner passages.

It was observed that combustion air flow is affected by the arrangement of open and closed burners, by the arrangement of fuel being burned in the burners array, and by the total air flow rate, which is dictated by the boiler.

Measurements of the static pressure in the primary and secondary air chambers of each burner were also conducted. It was verified that pressure in these chambers increases as the air flow ascends towards the line of burners in the top of the vertical section of the windbox did not present relevant differences. Comparison of results obtained for the boiler operating with and without steam generation did not present significant qualitative nor quantitative discrepancies, allowing for the conclusion that measurements taken in “cold flow” operation mode are representative of the air flow in the windbox. The experimental results also indicated the occurrence of a preferential ascending path, characterized by higher air flow velocity, inside the windbox.

In order to identify the main control variables in the process, design of experiments techniques were additionally used to define experiments. Factorial  $2^3$  planning and variance analysis of the main control variables affecting the flow of combustion air to the burners yielded models to predict the pressure field in the vertical section of the windbox as function of the total air flow rate and the opening position of the primary and secondary air dampers at the burners inlet. Predicted results presented good agreement with experimental results for the boiler operating without steam production in operating conditions different of those for which the models were generated and for the boiler operating with steam generation and all burners operating with primary and secondary air dampers fully open.

Keywords: Boiler, factorial  $2^3$  planning, variance analysis.

## ÍNDICE

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>1.1 Motivação do Trabalho</b> .....	13
<i>1.1.1 Escoamento de água e vapor</i> .....	13
<i>1.1.2 Escoamento de ar e gases</i> .....	15
<b>1.2 Revisão bibliográfica</b> .....	20
<b>1.3 Objetivo</b> .....	23
<b>2 FUNDAMENTOS</b> .....	25
<b>2.1 Equação de Bernoulli e medição de velocidade</b> .....	25
<b>2.2 Sondas de medição Pitot e estática de Pitot</b> .....	28
<b>2.3 Metodologia de planejamento e análise de experimentos</b> .....	33
<i>2.3.1 Conceitos básicos de experimentação</i> .....	34
<i>2.3.2 Réplicas, Blocagem e Aleatorização</i> .....	34
<i>2.3.3 Experimento com ponto central</i> .....	35
<i>2.3.4 Planejamento fatorial</i> .....	36
2.3.4.1 Análise estatística do modelo.....	37
<b>3 MATERIAS E MÉTODOS</b> .....	41
<b>3.1 Instrumentação cativa da caldeira</b> .....	41
<b>3.2 Medidas de temperatura na parede externa da fornalha</b> .....	41
<b>3.3 Sondas de medição de pressão estática e estagnação</b> .....	42
<b>3.4 Procedimentos de medição de pressão e temperatura</b> .....	46
<i>3.4.1 Pressão dinâmica no trecho vertical da caixa de ar</i> .....	46
<i>3.4.2 Pressão de estagnação no trecho horizontal</i> .....	47
<i>3.4.3 Medição de temperatura</i> .....	47
<b>3.5 Planejamento fatorial</b> .....	47
<b>4 RESULTADOS</b> .....	50
<b>4.1 Condições de operação nos testes</b> .....	50
<b>4.2 Análise dos experimentos com a caldeira em operação com geração de vapor</b> .....	54

<b>4.3 Análise dos experimentos com a caldeira apagada .....</b>	<b>66</b>
<b>4.4 Resultados da simulação por planejamento fatorial.....</b>	<b>71</b>
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>85</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>88</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>91</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>95</b>
<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>100</b>
<b>APÊNDICE D .....</b>	<b>101</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Parede d'água aletada [Fupai, 2007] .....	14
Figura 2 - Trocador de calor tipo regenerativo [adaptado de MHI, 1981].....	15
Figura 3 - Representação esquemática da caldeira 46GV01[adaptado de MHI, 1981].....	16
Figura 4 - Distribuição dos queimadores na caixa de ar [adaptado de MHI, 1981].....	18
Figura 5a - Refratário do queimador 1.....	19
Figura 5b - Bico ejetor de gás do queimador 3. ....	19
Figura 6 - Velocidade em função do $\sqrt{\Delta p}$ e $\rho$ [Delmeé, 1982].....	27
Figura 7 - Tomadas de pressão estática [Shames, 1973] .....	29
Figura 8 - Tomada de pressão [Schneider, 2012].....	29
Figura 9 - Efeito da forma dos orifícios na medição de pressão estática [Schneider, 2012] .....	30
Figura 10 - Determinação experimental do efeito da dimensão do diâmetro do furo utilizado para medição de pressão estática, para a relação $1,5 < L/d < 6,0$ [Schneider, 2012] .....	31
Figura 11- Tomada de medição de pressão estática e total [Schneider, 2000] .....	31
Figura 12 - Tubo de Prandtl ou de Pitot duplo [Delmeé, 1982] .....	32
Figura 13 - Correção da pressão de estagnação em função do ângulo de ataque para diferentes sensores cilíndricos [Schneider, 2012].....	33
Figura 14a - Fixação do conduíte de termopar na aleta da parede d'água.....	42
Figura 14b - Isolamento do conduíte de termopar com lã de rocha .....	42
Figura 15 - Distribuição dos termopares nas paredes externa da fornalha .....	42
Figura 16 - Posicionamento das sondas de estagnação no trecho horizontal da caixa de ar.....	43
Figura 17 - Detalhes construtivos e de instalação das sondas de estagnação .....	43
Figura 18 - Figura 18 - Distância lateral entre as sondas na secção do duto horizontal.....	44
Figura 19 - Figura 19 - Distribuição das sondas de estagnação e estática no trecho vertical da caixa de ar.....	44
Figura 20 - Montagem das sondas de estagnação e estática no trecho vertical. Direção do escoamento é ascendente.....	45
Figura 21 - Posicionamento das sondas de pressão estática nos queimadores.....	46
Figura 22 - Manômetro de tubo em U inclinado .....	46
Figura 23 - Queimadores acesos durante o teste 1 .....	55
Figura 24 - Pressão dinâmica ao longo do trecho vertical da caixa de ar, nas condições do teste 1. A seta indica o sentido do escoamento .....	55
Figura 25 - Pressão estática nas câmaras de ar primário e secundário dos queimadores em operação no teste 1.....	56
Figura 26 - Pressão de estagnação no duto horizontal, a jusante do trocador de calor tipo regenerativo (TCR), teste 1 .....	57
Figura 27 - Temperatura nas paredes laterais da caldeira, no teste 1. A parede oeste situa-se à direita, a leste à esquerda .....	58
Figura 28 - Configuração dos queimadores no teste 2.....	59
Figura 29 - Pressão dinâmica na caixa de ar no teste 2. A seta indica o sentido do escoamento em relação aos pontos de medição.....	59
Figura 30 - Pressão estática nas câmaras de ar primário e secundário dos queimadores, no teste 2 .....	61

Figura 31 - Pressão de estagnação no duto horizontal, a jusante do trocador de calor tipo regenerativo (TCR), teste 2. A seta indica o sentido do escoamento em relação aos pontos de medição .....	62
Figura 32 - Temperatura nas paredes laterais da caldeira, no teste 2. A parede leste situa-se à esquerda, a oeste à direita.....	63
Figura 33 - Configuração dos queimadores no teste 3.....	63
Figura 34 - Pressão dinâmica na caixa de ar no teste 3. A seta indica o sentido do escoamento em relação aos pontos de medição.....	64
Figura 35 - Pressão dinâmica na caixa de ar no teste 4. A seta indica o sentido do escoamento em relação aos pontos de medição.....	65
Figura 36 - Queimadores com registros abertos do teste 8 .....	67
Figura 37 - Pressão dinâmica na caixa de ar no teste 8. A seta indica o sentido do escoamento em relação aos pontos de medição.....	67
Figura 38 - Queimadores com registros abertos do teste 9 .....	68
Figura 39 - Pressão dinâmica na caixa de ar no teste 9. A seta indica o sentido do escoamento em relação aos pontos de medição.....	69
Figura 40 - Queimadores com registros abertos do teste 10 .....	70
Figura 41 - Pressão dinâmica na caixa de ar no teste 10. A seta indica o sentido do escoamento em relação aos pontos de medição .....	70
Figura 42 - Mapa da interação entre fatores, para o ponto 8. Os valores nos eixos dos gráficos referem-se à abertura percentual dos registros controlados .....	72
Figura 43 - Mapa de efeito principal para o ponto 8. Os valores nos eixos dos gráficos referem-se à abertura percentual dos registros controlados .....	73
Figura 44 - Distribuição de probabilidade normal dos resíduos no ponto 1 .....	75
Figura 45 - Distribuição de probabilidade normal dos resíduos no ponto 2 .....	75
Figura 46 - Distribuição de probabilidade normal dos resíduos no ponto 3 .....	75
Figura 47 - Distribuição de probabilidade normal dos resíduos no ponto 4 .....	75
Figura 48 - Distribuição de probabilidade normal dos resíduos no ponto 5 .....	76
Figura 49 - Distribuição de probabilidade normal dos resíduos no ponto 6 .....	76
Figura 50 - Distribuição de probabilidade normal dos resíduos no ponto 7 .....	76
Figura 51 - Distribuição de probabilidade normal dos resíduos no ponto 8 .....	76
Figura 52 - Distribuição de probabilidade normal dos resíduos no ponto 9 .....	76
Figura 53 - Distribuição de probabilidade normal dos resíduos no ponto 10 .....	76
Figura 54 - Distribuição de probabilidade normal dos resíduos no ponto 11 .....	77
Figura 55 - Distribuição de probabilidade normal dos resíduos no ponto 12 .....	77
Figura 56 - Resíduos padronizados por ordem de observação do Ponto 1 .....	77
Figura 57 - Resíduos padronizados por ordem de observação do Ponto 2 .....	77
Figura 58 - Resíduos padronizados por ordem de observação do Ponto 3 .....	77
Figura 59 - Resíduos padronizados por ordem de observação do Ponto 4 .....	77
Figura 60 - Resíduos padronizados por ordem de observação do Ponto 5 .....	78
Figura 61 - Resíduos padronizados por ordem de observação do Ponto 6 .....	78
Figura 62 - Resíduos padronizados por ordem de observação do Ponto 7 .....	78
Figura 63 - Resíduos padronizados por ordem de observação do Ponto 8 .....	78
Figura 64 - Resíduos padronizados por ordem de observação do Ponto 9 .....	78
Figura 65 - Resíduos padronizados por ordem de observação do Ponto 10 .....	78
Figura 66 - Resíduos padronizados por ordem de observação do Ponto 11 .....	79
Figura 67 - Resíduos padronizados por ordem de observação do Ponto 12 .....	79
Figura 68 - Comparação das pressões dinâmicas entre o experimental (teste 51) e o calculado em todos os pontos, na primeira verificação dos modelos.....	80

Figura 69 - Comparação das pressões dinâmicas entre o experimental (teste 11) e o calculado em todos os pontos, na segunda verificação dos modelos .....	81
Figura 70 - Comparação das pressões dinâmicas entre o experimental (teste 12) e o calculado em todos os pontos, na terceira verificação dos modelos .....	82
Figura 71 - Comparação das pressões dinâmicas entre o experimental (teste 13) e o calculado em todos os pontos, na quarta verificação dos modelos .....	83
Figura 72 - Comparação das pressões dinâmicas entre o experimental (teste 7) e o calculado em todos os pontos, na quinta verificação dos modelos .....	83

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Características da caldeira 1 .....	17
Tabela 2 - Queimadores com incidência de chama sobre refratário.....	19
Tabela 3 - Matriz de planejamento para experimento fatorial $2^3$ [adaptado de Montgomery e Runger, 2012] .....	36
Tabela 4 - Análise de variância para um modelo de três fatores fixos [ adaptado de Montgomery, 2001] .....	40
Tabela 5 - Instrumentação cativa da caldeira .....	41
Tabela 6 - Níveis de valores dos parâmetros adotados .....	47
Tabela 7 - Condições paramétricas dos experimentos.....	48
Tabela 8 - Resumo dos experimentos realizados com a caldeira acesa e apagada.....	51
Tabela 9 - Resumo dos experimentos realizados com a metodologia fatorial.....	53
Tabela 10 - Variáveis de processo mantidas fixas durante o teste 1 .....	54
Tabela 11 - Variáveis de processo mantidas fixas durante o teste 2 .....	58
Tabela 12 - Variáveis de processo mantidas fixas durante o teste 8 .....	67
Tabela 13 - Modelos $\Delta P=f(X1, X2, X3)$ obtidos por regressão para os pontos de medição .....	74

**LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

ANOVA	Analyses of variance
A	Área [m <sup>2</sup> ]
DOE	Design of Experiments
d	Diâmetro [m]
$\rho$	Densidade do fluido [kg/m <sup>3</sup> ]
g	Aceleração da gravidade [m/ s <sup>2</sup> ]
h	Altura [m]
T	Temperatura [°C]
Q	Calor [J]
U	Energia interna [J]
$\mu$	Viscosidade do fluido [kg /m s]
Ec	Energia cinética [J]
Ep	Energia potencial [J]
m	Massa do fluido [kg]
u	Velocidade do fluido [m/ s]
z	Cota vertical
V	Volume [m <sup>3</sup> ]
$\nu$	Viscosidade cinemática [m <sup>2</sup> / s]
n	Amostra
k	Variáveis explicativas
e	Erro
y	Resposta de interesse
$x_i$	Variáveis independentes
$\beta_i$	Coeficientes a serem estimados
$\varepsilon$	Erro experimental

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação do Trabalho

Este trabalho foi realizado na unidade de insumos básicos 2 da Braskem situada no município de Triunfo - Rio Grande do Sul. Esta unidade de negócios possui uma central termelétrica com três geradores de vapor superaquecido a pressão de 114,74 bar manométricos (117 kgf/cm<sup>2</sup>) e temperatura de 525 °C. A capacidade total de geração de vapor é de 840 ton/h. Parte deste vapor gerado é utilizado para geração de energia elétrica em dois grupos geradores e outra parte é utilizada como energia térmica nos processos petroquímicos.

Os combustíveis utilizados na matriz energética dos geradores de vapor são:

- Caldeira 1 (46GV01) - queima frontal, utiliza combustíveis líquidos e gasosos: óleo 3A (óleo de refinaria), óleo tipo 2 (produzido internamente na Braskem), gás combustível (GLP) e gás rico em vinil-acetileno. Preferencialmente, esta caldeira fica na reserva operando em situações de emergência ou quando outra caldeira esteja em manutenção.

- Caldeiras 2 e 3 (46GV02 e 46GV03) - queima tangencial, utiliza combustíveis sólidos, líquidos e gasosos: carvão mineral, óleo 3A, óleo tipo 2, gás combustível e gás rico em vinil-acetileno.

As três caldeiras são do tipo aquatubular. Neste tipo de caldeiras, os gases quentes da combustão circulam na fornalha e no interior de tubos circula o fluido de trabalho (água) que irá mudar de fase para geração de vapor. Os principais componentes da caldeira 1 e sua descrição são: fornalha, seções de irradiação e convecção, superaquecedor, economizador, pré-aquecedor de ar (tipo regenerativo), tubulão<sup>1</sup>, queimadores, sopradores de fuligem, ventilador forçado e chaminé. Para uma descrição detalhada desses sistemas recomenda-se a leitura de Joseph e Singer, 1991.

### 1.1.1 Escoamento de água e vapor

A água de alimentação que entra na caldeira passa primeiro pelo economizador (zona de convecção), que tem por finalidade pré-aquecer a água de caldeira antes de entrar no

---

<sup>1</sup> Nota do autor: neste trabalho, será utilizado o termo “tubulão” como ocorre na literatura técnica especializada em sistemas de geração e utilização de vapor, ao se referir ao tambor principal de vapor, do inglês *steam drum*.

tubulão de vapor, aproveitando o calor dos gases de saída, evitando que este ganho de temperatura se faça com maior consumo de combustível.

Ao sair do economizador a água supre o tubulão. O tubulão de vapor alimenta os tubos das paredes frontal, fundos e as paredes laterais da fornalha. Essas paredes, as laterais, frontais, teto e piso formam um espaço vazio chamado de câmara de combustão ou fornalha.

É nos tubos destas paredes que ocorre a geração controlada de vapor saturado. Na parede d'água existe uma união física entre tubos, cuja principal função é a contenção dos gases no interior da caldeira e que funciona como superfície estendida (aleta) para aumento da área de troca de calor. Externamente, estes tubos são revestidos com isolamento térmico e proteção metálica, como mostrado esquematicamente na Figura 1.

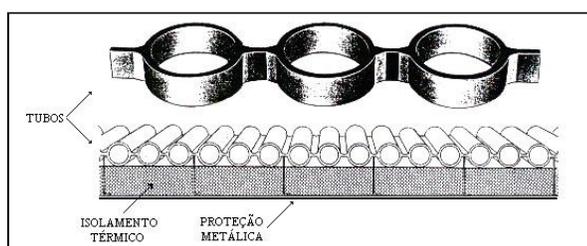


Figura 1 – Parede d'água aletada [Fupai, 2007]

Os tubos da parede de fundo da caldeira sobem na direção do arco da fornalha. Estes tubos são separados na parte superior da fornalha para permitir a passagem dos gases de combustão.

A água nas paredes laterais da caldeira absorve calor. A mistura resultante de água e vapor é descarregada no tubulão. No tubulão ocorre a separação da água e vapor e a remoção dos sólidos dissolvidos na água.

O vapor separado no tubulão vai para a entrada dos superaquecedores, os quais são superfícies de absorção de calor que têm como finalidade aumentar a temperatura do vapor acima do seu ponto de saturação. Existem vários motivos para fazê-lo. Primeiro por constituir um evidente ganho termodinâmico na eficiência. A segunda vantagem é que o superaquecimento seca o vapor necessário para o processo industrial ou para ser admitido em uma turbina nessa condição, eliminando a possibilidade de um elevado teor de umidade nos últimos estágios, e conseqüentemente erosão das palhetas.

### 1.1.2 Escoamento de ar e gases

O escoamento de ar e gases é controlado pela abertura do registro na sucção do ventilador que fornece ar para a caldeira para que resulte numa boa queima do combustível que está sendo utilizado. O ar de combustão alimentado pelo ventilador passa pelo trocador de calor tipo regenerativo, trocando calor com os gases de combustão, de modo que a temperatura dos gases é diminuída até próxima da temperatura do ponto de orvalho dos gases. O trocador de calor tipo regenerativo consiste de um rotor, girando entre 1 e 2 rpm, com uma série de elementos corrugados de metal, que permitem uma grande superfície de contato para a transmissão de calor e pequena resistência ao fluxo de ar ou gás, Figura 2.

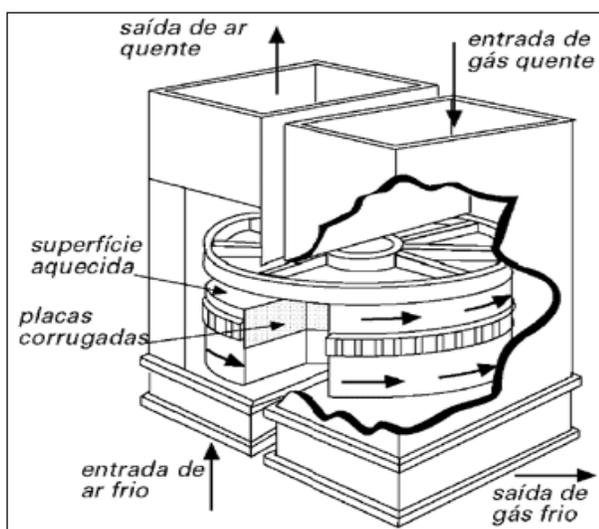


Figura 2– Trocador de calor tipo regenerativo [adaptado de MHI, 1981].

A rotação do motor permite a passagem alternada dos elementos de transferência de calor através das zonas de ar e gases de combustão. O escoamento dos gases da combustão aquece os elementos metálicos do rotor em movimento. O rotor quente, quando se encontra na secção de ar do aquecedor, aquece o ar que flui através das passagens do rotor. Desta forma o rotor transfere calor dos gases da combustão para o ar.

A corrente de ar aquecido segue para a fornalha, onde se mistura com o combustível, ocorrendo a combustão. Pelo fenômeno da tiragem, realizado pela chaminé, os gases quentes, produtos da combustão, circulam por toda a fornalha até serem lançados na atmosfera. A pressão manométrica na câmara de combustão é positiva e oscila em torno de 200 mmH<sub>2</sub>O. Nas regiões internas da caldeira, a energia dos combustíveis é cedida ao fluido de trabalho nos

seguintes modos: aquecendo a água no economizador; vaporizando-a na caldeira; transformando o vapor saturado em vapor superaquecido no superaquecedor. A maior parcela da energia é absorvida nas superfícies expostas diretamente às chamas na câmara de combustão, onde predomina a troca de calor por radiação.

O estudo descrito neste trabalho foi realizado na caldeira 1 - 46GV01<sup>2</sup>, apresentada esquematicamente na Figura 3.

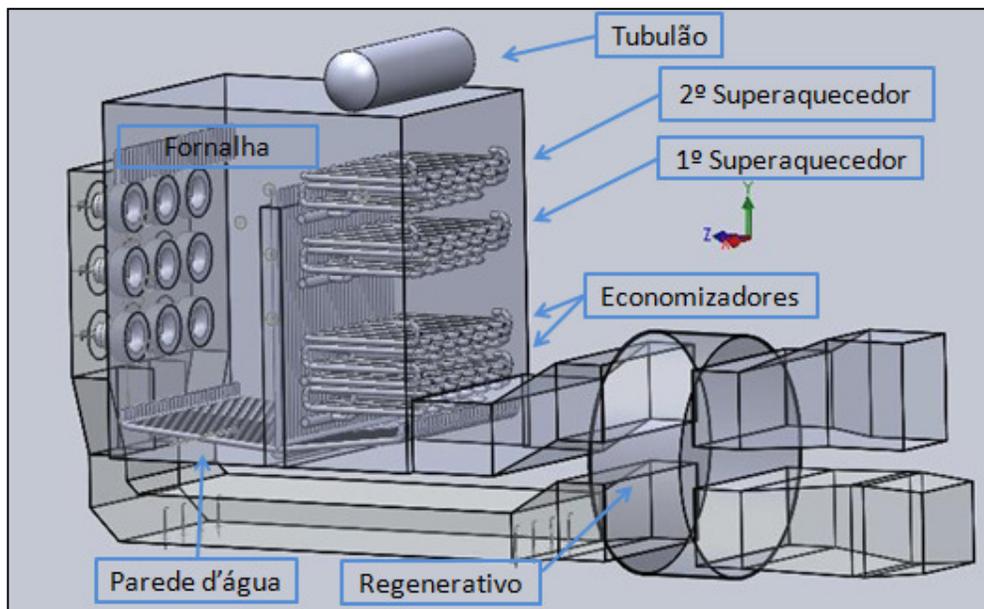


Figura 3- Representação esquemática da caldeira 46GV01[adaptado de MHI, 1981].

---

<sup>2</sup> Nota do autor: 46GV01 é o termo utilizado pela Braskem. O primeiro número, refere-se à unidade interna da fábrica, as letras “GV” significam gerador de vapor e o último número à seqüência das caldeiras.

Este gerador possui a capacidade nominal de 280 ton/h de vapor. E apresenta as seguintes características: conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Características da caldeira 1.

<b>46GV01</b>	
Identificação	46-GV-01
Fabricante	Mitsubishi
Modelo	Frontal
Vapor	Superaquecido
Capacidade nominal	280 ton/h
Pressão efetiva	113 kgf/cm <sup>2</sup>
Temperatura	525 °C
Ventilador de insuflamento (quantidade)	1
Chaminé individual (altura)	120 m
Pré-aquecimento a vapor do ar (quantidade)	1
Pré-aquecimento regenerativo do ar (quantidade)	1
Pressão da fornalha	200 mmca
Número de níveis com queimadores	3
Queimadores de óleo por nível	3
Número de níveis com queima de líquidos/gás	2
Queimadores mistos líquido/gás	6
Bocal das lanças de óleo	Y-Jet
Pressão do vapor de nebulização (fixo)	5 kgf/cm <sup>2</sup>

Os queimadores estão montados em uma das paredes, em diferentes níveis. Tem-se, portanto, saindo dos queimadores, jatos concêntricos (jato central de combustível e jato anular de ar). As dimensões da câmara são tais que esses jatos se comportam como se fossem jatos livres.

A câmara de combustão tem área de 1230 m<sup>2</sup> de superfície de troca de calor. A disposição dos queimadores em relação a fornalha é do tipo frontal, com todos os

queimadores distribuídos em três níveis, em apenas uma parede, cada nível com 3 queimadores. Os queimadores estão distribuídos equidistantemente em três linhas por três colunas em uma parede de 7425 mm de largura por 6400 mm de altura com profundidade da caixa de suprimento de ar de 1293 mm.

Na Figura 4, pode-se verificar o posicionamento dos queimadores nas 3 colunas, em uma vista superior, frontal e lateral.

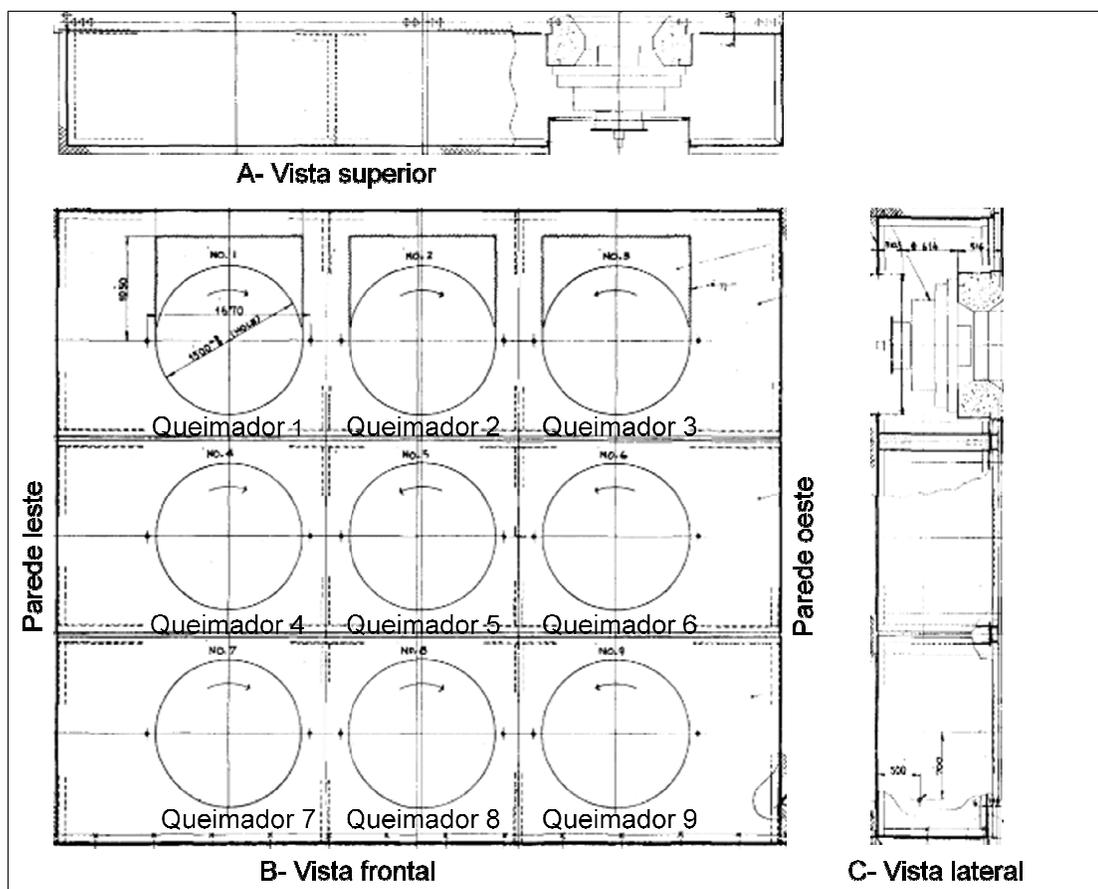


Figura 4 – Distribuição dos queimadores na caixa de ar [adaptado de MHI, 1981].

Na inspeção e manutenção de NR-13 desta caldeira, realizada em dezembro de 2011, foi observado alguns desgastes em alguns queimadores que poderiam estar associados aos fenômenos da combustão. Em relação à incidência de chama nos refratários, percebeu-se a ocorrência deste problema em torno dos queimadores indicados na Tabela 2.

Tabela 2- Queimadores com incidência de chama sobre refratário.

Queimador	Parte Superior	Parte Inferior
01	Incide sobre refratário	Incide sobre refratário
02	Incide sobre refratário	Incide sobre refratário
03		
04	Incide sobre refratário	
05	Incide sobre refratário	Incide sobre refratário
06		
07		Incide sobre refratário
08		Incide sobre refratário
09	Incide sobre refratário	Incide sobre refratário

Nas Figuras 5a e 5b são mostrados os danos em dois queimadores, resultantes da aproximação da chama sobre o refratário e bico ejetor do queimador de gás combustível. O refratário do queimador 1 apresentava-se bastante danificado como se pode observar na Figura 5a. Da mesma forma, o dano obtido no queimador 3 é mostrado na Figura 5b.



Figura 5a- Refratário do queimador 1.



Figura 5b- Bico ejetor de gás do queimador 3.

Dentre os fatores que influenciam a operação dos queimadores e que são considerados como potenciais causadores de danos, destacam-se a variação das dimensões das áreas de passagem entre pás no *swirler* (resultante de recuperações inadequadas) e a má distribuição de ar na caixa de alimentação. Esses fatores são considerados os mais importantes de fato, por inspeção foi verificado que, como resultado de intervenções anteriores, as aletas dos *swirlers* dos queimadores 1 e 3 apresentavam variações nas dimensões que acarretavam significativa variação das áreas de passagem do ar nestes dispositivos. Lacava e Alves, 2009, explicam que *swiler* provoca uma região de recirculação na zona primária da câmara de combustão, estabilizando e confinando a chama nesta região.

Desta forma, previamente à realização deste estudo da distribuição do ar na caixa de distribuição de ar da caldeira, todos os *swirlers* foram devidamente consertados.

O fato dos queimadores serem montados numa das paredes limita o comprimento das chamas, sob pena delas incidirem na parede oposta. Por este motivo, e ainda devido às baixas temperaturas das superfícies da câmara, tais queimadores são construídos de forma a operarem com índices de *swirl* relativamente altos, o que mantém pequenas distâncias de ignição, comprimentos de chama adequados à dimensão da câmara de combustão e taxas de emissão de carbono não convertido relativamente baixas, mesmo operando com óleos bastante pesados.

O índice de *swirl*, também conhecido como índice de rotação do queimador, influi fortemente na qualidade da mistura combustível-ar-gases de combustão. Segundo Lacava e Alves, 2009, a intensidade da zona de recirculação é afetada principalmente pelo ângulo, número e tipo de pás do *swirler*, e pela vazão de ar através das pás.

Adicionalmente, IPT, 2004, explica que o aumento do índice de *swirl* do queimador aumenta a taxa do ar primário e eleva a taxa de gases recirculados para o centro da parte inicial do jato, fazendo com que aumente a taxa de pirólise das gotas, com conseqüente aceleração de todo o processo de combustão e, portanto, reduzindo a taxa de emissão de coque. Como efeito secundário tem-se a diminuição do comprimento de chama, e eventualmente a redução das trocas de calor por radiação entre a chama e a superfície envolvente.

## 1.2 Revisão bibliográfica

Uma revisão da literatura disponível foi feita com o objetivo de identificar outros trabalhos de pesquisa sobre a alimentação de ar de combustão em caldeiras frontais multicomcombustível.

Embora a busca tenha incluído outras palavras-chaves mais genéricas, com o objetivo de tentar alcançar trabalhos com foco em outros tipos de caldeira e também trabalhos envolvendo a modelagem desses equipamentos, verificou-se que há poucos trabalhos, experimentais e de modelagem, reportados na literatura sobre operação de equipamentos industriais, e que o foco é o escoamento de gases na fornalha e a jusante dela.

Como exemplo, Zhou *et alli*, 2007, estudaram os campos de velocidade formados na saída, no meio e na parte superior da fornalha de uma caldeira a carvão de queima tangencial. Para tanto, eles utilizaram diferenças finitas como método numérico e um modelo em escala,

através do qual, o modelo numérico foi validado e apontamentos em relação aos campos de velocidades citados foram confirmados. Os modelos experimental e numérico tiveram uma concordância de resultados e indicaram uma diferença significativa da velocidade dos gases de combustão próximo às laterais da fornalha estudada, considerando uma injeção de ar anti-horária a partir dos queimadores.

Xu *et alli*, 2000, desenvolveram um modelo para a fornalha de uma caldeira da EDP (Eletricidade de Portugal). A caldeira em questão era de queima frontal, com carvão pulverizado com combustível. Os autores usaram resultados experimentais como dados de entrada para a velocidade de entrada do ar, dispersão do carvão, etc., e calcularam os campos de temperatura, os fluxos de calor convectivo e de radiação, além do teor de O<sub>2</sub> nos diferentes pontos da fornalha.

A simulação foi feita para condições normais de operação, para validação do modelo pela comparação dos resultados com dados medidos de temperatura de saída dos gases, teor de oxigênio, carbono não queimado, emissão de NO<sub>x</sub>, fluxo de calor perdido através das paredes e o fluxo de calor transmitido aos superaquecedores.

Dentre os poucos trabalhos encontrados, é de ressaltar o de Bhasker, 2002, que tem foco na caixa de ar de uma caldeira do tipo CFBC (combustão em leito fluidizado circulante) queimando carvão com calcário suspensos em uma corrente de ar vertical, enquanto as partículas menores de carvão são levadas para a parte superior da fornalha para combustão.

O estudo é teórico e o autor utiliza o aplicativo de dinâmica de fluidos computacional CFX para simulações que se dão em três passos:

- 1- Simulação da caixa de ar a partir do duto de entrada até a entrada dos difusores.
- 2- Utilizando os resultados do primeiro passo, é realizada a simulação de um dos difusores.
- 3- Após a simulação de um dos difusores, é feita a simulação em conjunto de difusores arranjados em linhas e colunas.

A caixa de ar em questão tem medidas de 7,21 x 6,8 m na parte onde se encontram 400 difusores circulares com diferentes raios. A seção transversal da caixa de ar varia ao longo de sua altura o que influencia na perda de carga e conseqüentemente na velocidade final do ar na entrada dos difusores. A simulação, então, tem por objetivo estudar o efeito que dessa geometria sobre a velocidade final do ar, já que esta velocidade influenciará na qualidade da combustão, emissões atmosféricas e eficiência da caldeira.

O entendimento básico desenvolvido nesse estudo através de técnicas de CFD (*computational fluid dynamics*) permitiu identificar regiões de baixas velocidades, altas pressões e alta intensidade de turbulência. A variação desses parâmetros tem um considerável impacto na distribuição de ar e combustível nos queimadores. Mais efeitos e resultados podem ser obtidos uma vez que o estudo englobe mais partes do sistema. A distribuição não uniforme do fluxo de ar para o queimador é muito importante para a produção dos produtos da combustão, como monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio. A ferramenta de análise pode ser utilizada para recomendar mudanças na geometria visando à minimização da perda de carga e uma distribuição de ar mais uniforme.

Recentemente, Li *et alli*, 2010, apresentaram resultados do estudo experimental da influência do estagiamento de ar nas características do escoamento em uma caldeira do tipo *down-fired* com queimadores dotados de *swirlers*.

O trabalho experimental foi conduzido “a frio” em um modelo em escala 1:15 de uma caldeira de queima vertical para baixo. Os autores argumentam que apesar de experimentos a frio não representarem bem a fluidodinâmica real, fornecem fortes indícios, principalmente em modelos reduzidos, da influência dos parâmetros operacionais sobre o escoamento.

A caldeira tem quatro entradas de ar, primário (junto com o carvão pulverizado), secundário (através do próprio queimador), através do *vent* e do ar estagiado (oriundo da caixa de ar, assim como o secundário). O experimento consistiu em variar a porcentagem de ar total que é injetada na câmara de combustão através do estagiamento e medir o campo de velocidades em uma seção transversal da fornalha concluindo as combinações mais adequadas para a queima.

O estagiamento do ar varia de 7 a 20% do total, com conseqüente diminuição do ar secundário, e os autores concluem que, para valores baixos da fração de ar estagiado, a velocidade do ar secundário é alta e o ar do *vent* não é suficiente para recircular o ar do queimador, que penetra em grande profundidade na fornalha. Já para valores de estagiamento mais altos, ocorre muita recirculação próxima aos queimadores podendo haver carvão pulverizado na garganta da fornalha.

Outra variável são as palhetas que controlam a saída do ar secundário no queimador, elas variam de 20, 25, 30, 35, 40, 50 graus enquanto maior o ângulo, mais disperso é o fluxo de ar e menor é a velocidade longitudinal, conseqüentemente o ar atinge profundidades menores dentro da fornalha.

Experimentos industriais foram realizados nesse tipo de caldeira variando-se a entrada de ar estagiado e identificou-se que o aumento da proporção de ar estagiado acarreta aumento

da temperatura dos gases de exaustão e da água dos superaquecedores, assim como aumento do material não queimado e diminuição da eficiência da caldeira e a emissão de NOx. Isto ocorre porque, com proporções maiores de ar estagiado, apesar de os níveis de turbulência na fornalha aumentarem, estes ficam restritos às áreas superiores antes da garganta da fornalha, o que demonstra pouca penetração do ar primário e secundário e conseqüentemente um curto período de residência do combustível o que gera alta proporção de combustível não queimado, pouca troca térmica, logo altas temperaturas de exaustão que resultam em baixa eficiência de caldeira.

Indrusiak, 1997, estudou experimentalmente o comportamento do escoamento em um modelo de duto curvo de seção retangular das caldeiras dos grupos geradores 3 e 4 da Usina Presidente Médici e, considerando dados fornecidos pela empresa explora, a causa da erosão causada nos tubos do economizador. Para este fim foi construído um modelo em escala de parte da caldeira, reproduzindo o duto curvo de retorno dos gases e, na saída do mesmo, um banco de barras de seção circular, simulando o banco de tubos do economizador. Foram feitas medições de velocidades de gases de combustão com cinzas, utilizando uma sonda tipo tubo de Pitot e anemômetro de fio quente, medições do campo de pressão nas paredes e visualização do escoamento utilizando fios de lã foram aplicadas, propostas segundo critérios de controle de camada limite. As medições, feitas com sonda tipo tubo de Pitot, foram confirmadas, para as configurações estudadas no trabalho, por medições realizadas com anemômetro de fio quente. Houve em geral boa concordância entre os resultados.

### **1.3 Objetivo**

O desempenho geral de uma caldeira depende significativamente de como ar de combustão e combustível entram na fornalha. Grandes caldeiras de combustíveis fósseis podem ter diversos queimadores individuais que injetam combustíveis e ar. A proporção da vazão através de cada um destes tem um papel importante na eficácia do processo de combustão. Ao conceber adequadamente o sistema de combustão, as emissões de NOx e CO das plantas podem ser minimizados enquanto que a eficiência da caldeira e longevidade equipamento são maximizados.

O conhecimento do comportamento dos fatores que afetam o processo de combustão industrial permite introduzir melhorias na qualidade do processo, fornecendo à empresa meios para otimizar a operação e reduzir os custos de produção.

Assim, o objetivo deste trabalho é estudar experimentalmente as características do escoamento de ar para combustão de uma caldeira de queima frontal de uma central termelétrica, visando conhecer o campo de velocidade ao longo dos dutos de suprimento de ar de combustão e sua distribuição para os queimadores.

## 2 FUNDAMENTOS

Nesse capítulo inicialmente serão apresentados os fundamentos da mecânica dos fluidos e uma abordagem a respeito de medição de velocidade. Logo em seguida abordar-se-á alguns conceitos de sondas de medição de pressão. No final do capítulo apresentar-se-á a metodologia do projeto de experimentos, em que se baseia a metodologia aplicada no desenvolvimento deste trabalho.

Na continuação, será apresentada a metodologia adotada no estudo do campo de velocidades na caixa de alimentação da caldeira de queima frontal.

### 2.1 Equação de Bernoulli e medição de velocidade

O objetivo desta seção é introduzir os conceitos que permitiram estudar as seguintes aplicações práticas: determinação da velocidade real do escoamento através do tubo de Pitot; determinação indireta da vazão do escoamento através dos orifícios, bocais, placas de orifício e tubo Venturi; determinação das cargas totais nas seções do escoamento e estabelecer o sentido de escoamento.

O conhecimento e a compreensão dos princípios básicos e dos conceitos da mecânica dos fluidos são essenciais para análise de qualquer sistema no qual um fluido é o meio operante [Fox, 2006]. A análise de qualquer problema de mecânica dos fluidos começa, necessariamente, de modo direto ou indireto, com a declaração das leis básicas que governam o movimento dos fluidos. As leis básicas aplicáveis a qualquer fluido são a conservação de massa, a segunda lei do movimento de Newton, o princípio da conservação da quantidade de movimento angular, a primeira lei da termodinâmica e a segunda lei da termodinâmica.

Conforme White, 2002, a definição de escoamentos passa pela medição de propriedades locais, integradas e globais. As propriedades locais podem ser termodinâmicas, como pressão, temperatura, massa específica, etc., que definem o estado do fluido, além de sua velocidade. As propriedades integradas são as vazões em massa e volumétrica, e as propriedades globais são aquelas relativas à visualização de todo campo de escoamento.

Segundo Çengel, 2007, para o estudo destas aplicações deve-se efetuar um balanço de energia entre duas seções do escoamento, o que é viabilizado pela aplicação da equação da energia. No caso em estudo, as restrições impostas foram: escoamento unidirecional, incompressível, isotérmicos e em regime permanente. Nos casos mencionados as restrições

permitem considerar, tanto a massa específica ( $\rho$ ), como o peso específico ( $\gamma$ ), constantes ao longo do escoamento. Fato do escoamento ser isotérmico, variações de energia térmicas se devem apenas à variações da energia mecânica. Evocando os conceitos de energias abordados pela física, estabelecemos os diversos tipos de energia mecânica observadas em uma seção do escoamento unidirecional, incompressível e em regime permanente. Os tipos de energia são: energia cinética, energia potencial de posição e energia potencial de pressão.

O escoamento de um fluido incompressível, definido numa região limitada, é descrito pelos princípios da conservação do momento linear e da massa. Para o caso especial de escoamento incompressível, em regime permanente, sem atrito, escoamento ao longo de uma linha de corrente,  $\rho = constante$ , o balanço da quantidade de movimento linear se reduz à conhecida equação de Bernoulli:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz = constante \quad (2.1)$$

Este resultado vale para escoamentos incompressíveis, como acontece em líquidos e também em gases com o número de Mach inferior a 0,3. A equação de Bernoulli pode ser aplicada a dois pontos distintos (1 e 2) sobre uma linha de corrente, o que leva à expressão:

$$\left(\frac{1}{2}\rho u^2 + \rho gz + p\right)_2 = \left(\frac{1}{2}\rho u^2 + \rho gz + p\right)_1 \quad (2.2)$$

Quando uma partícula de fluido atinge uma barreira ou obstáculo, sua velocidade  $u$  vale zero, e a conservação de energia pode ser escrita como a Eq. 2.3.

$$(p_o - p)_{inc} = \rho \frac{u^2}{2} \quad (2.3)$$

Onde  $p$  é a pressão termodinâmica ou estática,  $p_o$  a pressão de estagnação, e o sub-índice *inc* designa que se trata de um escoamento incompressível. O termo à esquerda da equação também é chamado de pressão dinâmica.

Da Eq. 2.3 a soma das pressões estática e dinâmica é chamada de pressão de estagnação e é expressa como representado na Eq. 2.4.

$$p_0 = p + \rho \frac{u^2}{2} \quad (2.4)$$

A pressão de estagnação representa a pressão em um ponto no qual o fluido é parado totalmente de forma isoentrópica. As pressões estática, dinâmica e de estagnação são medidas em um local especificado, a velocidade do fluido naquele local pode ser calculada pela Eq. 2.5.

$$u = \sqrt{\frac{2(p_0 - p)}{\rho}} \quad (2.5)$$

A Equação 2.5 é útil na medição de velocidade do escoamento quando uma combinação entre uma tomada de pressão e um tubo de Pitot for usada. A Figura 6, Delmeé, 1982, apresenta um gráfico de avaliação da velocidade do fluido em função da pressão diferencial e do peso específico.

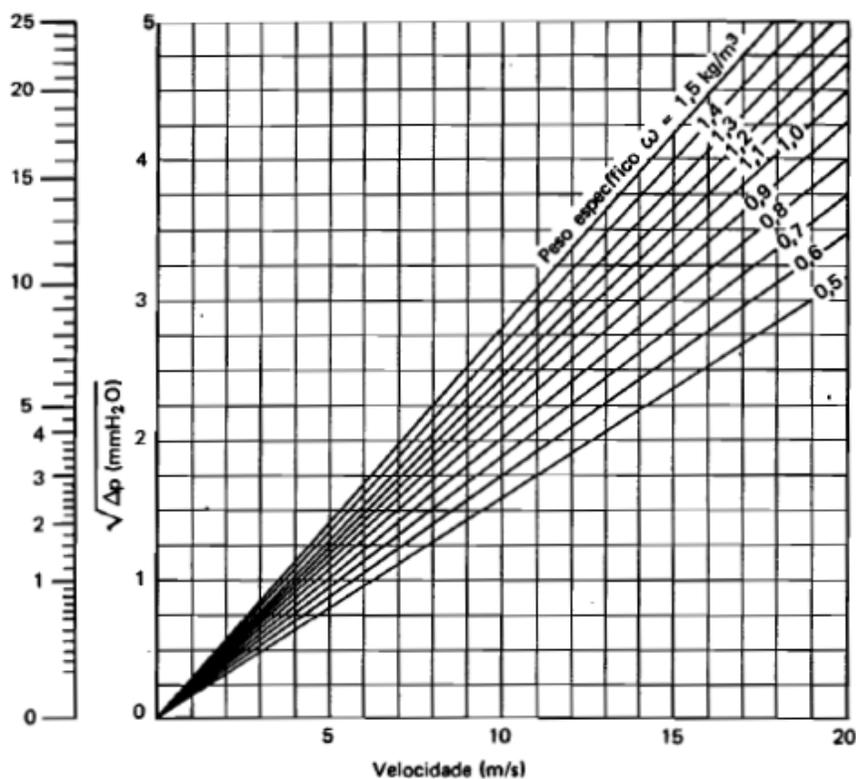


Figura 6 - Velocidade em função do  $\sqrt{\Delta p}$  e  $\rho$  [Delmeé, 1982].

Para determinação da vazão dos fluidos, inúmeros dispositivos foram desenvolvidos com a finalidade de medir o escoamento. Os medidores de vazão variam amplamente em seu nível de tecnologia, geometria, custo, exatidão, versatilidade, capacidade, queda de pressão e princípio operacional. Alguns medidores de vazão medem a vazão diretamente, descarregando e recarregando uma câmara de medição de volume conhecido continuamente e controlando o número de descargas por unidade de tempo. Entretanto, a maioria dos instrumentos mede indiretamente a vazão, a partir da medição da velocidade média do escoamento ou da pressão de arraste, que permitem determinar esta velocidade, e determinam a vazão em massa de acordo com a Eq. 2.6:

$$\dot{m} = \rho V_{med} A_c \quad (2.6)$$

Onde  $A_c$  é a área de seção transversal do escoamento. Portanto a medição de vazão, em geral, é feita medindo-se a velocidade do escoamento. A velocidade do fluido escoando em um tubo varia de zero na parede até um valor máximo no centro, e é importante lembrar-se deste fato ao tomar medições de velocidade. Para o escoamento laminar, por exemplo, a velocidade média é metade da velocidade do eixo central. Para escoamentos turbulentos, existe uma distância correta da parede para medir a velocidade média em escoamento turbulento.

## 2.2 Sondas de medição Pitot e estática de Pitot

De acordo com Delmeé, 1982, em 1732, Henri Pitot propôs o primeiro instrumento para medir velocidade de líquidos. O tubo de Pitot daquela época era bem rudimentar. Compunha-se de um tubo de vidro curvado em ângulo reto, cujo ramal vertical era mantido fora d'água, enquanto o ramal horizontal, provido de um bocal em forma de funil, era colocado dentro da corrente d'água. Com o passar dos tempos aperfeiçoou-se muito o aparelho originalmente idealizado usando-se a medição de correntes de líquidos ou de gases em tubos fechados e pressurizados.

Segundo Çengel, 2007, as sondas de Pitot (também chamadas de tubos de Pitot) e as sondas estáticas de Pitot são amplamente utilizadas para medição de vazão. Uma sonda de Pitot é simplesmente um tubo com uma tomada de pressão no ponto de estagnação que mede a pressão de estagnação, enquanto uma sonda estática de Pitot tem a tomada de pressão de

estagnação e várias tomadas de pressão estática na circunferência, e mede tanto pressão de estagnação quanto a pressão estática, em um ponto de escoamento.

Para a compreensão do uso do tubo de Pitot, deve-se entender, tanto o conceito de pressão estática, como o conceito de pressão dinâmica. A pressão estática é a pressão que age da mesma forma em todas as direções e que é inerente à posição do escoamento para uma dada vazão. A tomada da pressão estática deve ser realizada perpendicularmente ao escoamento como mostra a Figura 7.

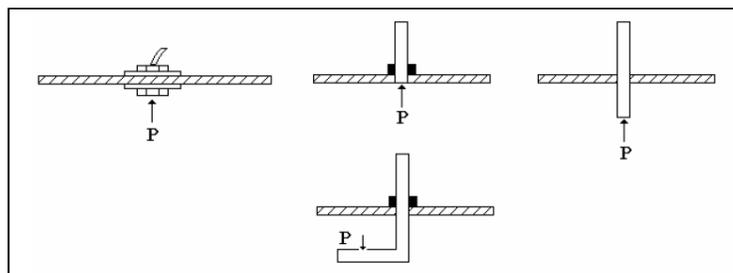


Figura 7 – Tomadas de pressão estática [Shames, 1973].

Schneider, 2012, recomenda que a medição da pressão estática pode ser obtida por processos onde pequenos furos ou orifícios são feitos na parede de interface do escoamento, sempre evitando perturbá-lo, conforme Figura 8.

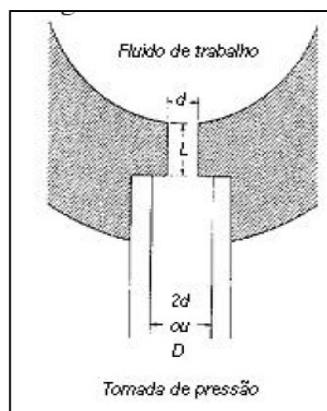


Figura 8 - Tomada de pressão [Schneider, 2012].

Os procedimentos mais comuns envolvem as válvulas de parede, constituídos por um furo normal ao escoamento do fluido. Os formatos e tipos de acabamentos que podem ser empregados para a construção das tomadas de pressão estática podem provocar, para um mesmo diâmetro  $d$ , diferentes erros ou comportamentos. A Figura 9 mostra um catálogo de

opções usuais de construção e instalação dos furos, onde são apresentados os desvios percentuais na pressão estática lida, em relação a um orifício de referência, de bordas com ângulos retos ou vivos. As montagens indicam as variações em percentagem da pressão dinâmica lida, que deve então corrigir a pressão estática. Todos os efeitos são resultantes da componente de velocidade normal à direção do escoamento, que passa a interferir na leitura da pressão estática.

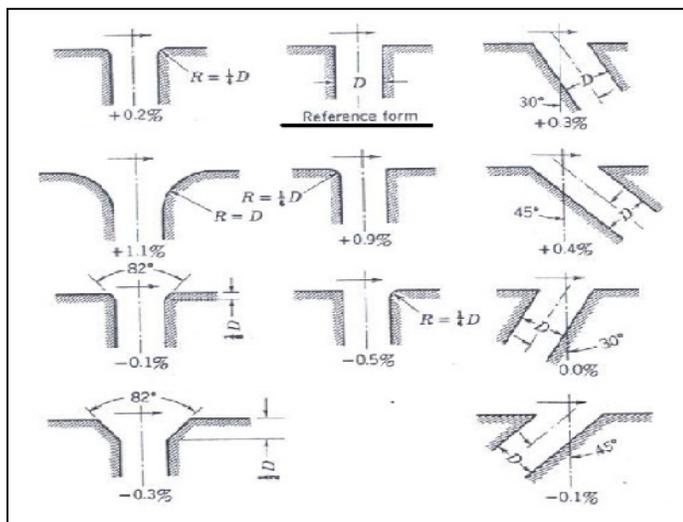


Figura 9 - Efeito da forma dos orifícios na medição de pressão estática [Schneider, 2012].

Conforme Schneider, 2012, os furos muito pequenos são mais indicados por causar pouca perturbação no escoamento, mas em compensação apresentam dificuldades de usinagem e de limpeza. Para uma correta definição da dimensão do orifício a ser empregado para um escoamento, deve-se recorrer a um procedimento experimental de ajuste, onde o diâmetro “d”, ver Figura 8, é variado em torno de uma faixa de dimensões, até que se construa uma curva semelhante à da Figura 10. O furo de referência é determinado experimentalmente, bem como as curvas de correção correspondentes, que indicam que os erros nesses dispositivos aumentam sempre com o aumento do diâmetro d, a partir do furo de referência.

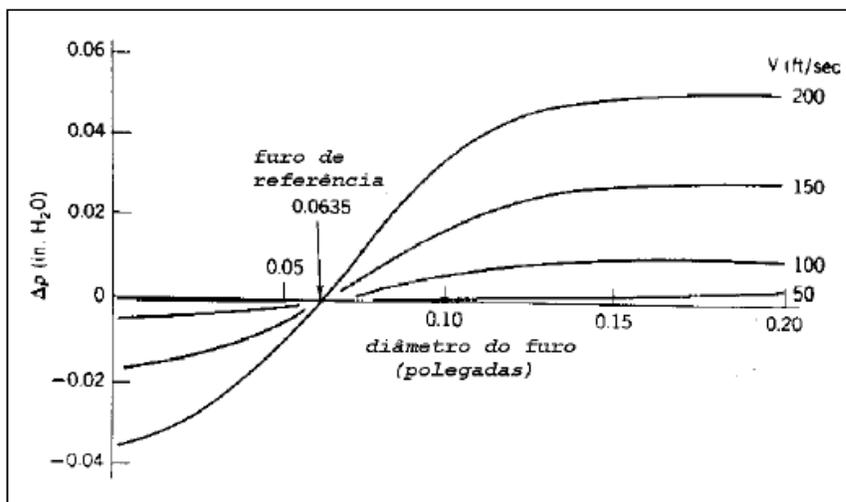


Figura 10 - Determinação experimental do efeito da dimensão do diâmetro do furo utilizado para medição de pressão estática, para a relação  $1,5 < L/d < 6,0$  [Schneider, 2012].

Segundo Schneider, 2012, a dimensão  $L/d$  nunca deve ser inferior a 1,5, é recomendado que essa relação se mantenha em  $1,5 < L/d < 15$ . A mesma literatura apresenta os procedimentos mais detalhados para o cálculo do erro de medição da pressão estática em orifícios. As montagens apresentadas na Figura 9 são empregadas para leitura da pressão média de um escoamento.

A pressão dinâmica representa o aumento de pressão quando fluido em movimento é parado de forma isentrópica. A sonda deve ser posicionada contra o escoamento na tentativa de medir a pressão dinâmica, porém pelo próprio conceito de pressão estática, o que conseguimos medir é a pressão total  $p_o$  que representa a soma da pressão estática com a pressão dinâmica, conforme pode ser observado na Figura 11.

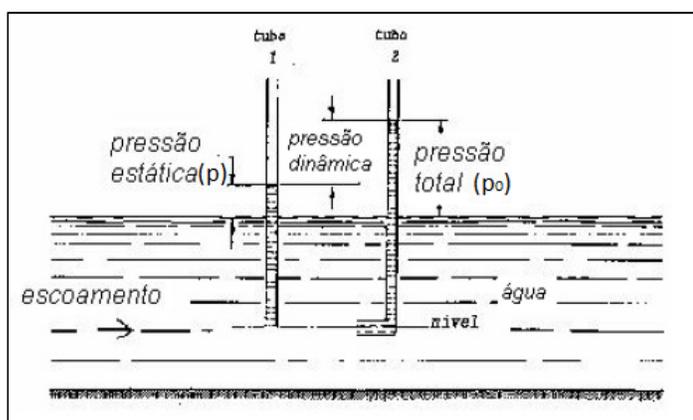


Figura 11- Tomada de medição de pressão estática e total [Schneider, 2000].

Na construção de um tubo de Pitot, consideram-se duas seções para tomada de pressão, respectivamente a total  $p_0$  e a estática  $p$ ; seções estas que devem se encontrar suficientemente próximas para considerar a pressão estática constante.

Segundo Delmeé, 1982, o aparelho derivado do Pitot, que tem suas tomadas de pressão total e estática combinadas num só instrumento, chama-se também tubo de Prandtl. Costuma-se, entretanto, chamar tubo de Pitot todo sistema de medição de velocidade local derivado do sistema original de Henri Pitot. O tubo de Prandtl, ou tubo de Pitot duplo, ou ainda Pitot estático, é um aparelho constituído por dois tubos coaxiais. Na extremidade do tubo interno, colocada face à corrente, atua a pressão total, enquanto a pressão estática é a que atua nos pequenos orifícios da parede do tubo externo, distante da ponta do tubo, ver Figura 12.

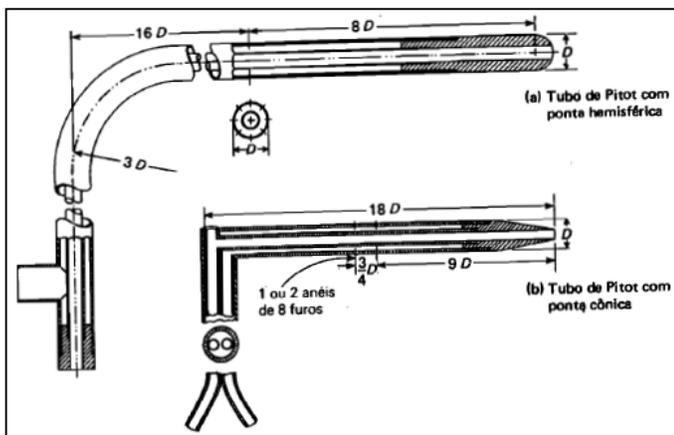


Figura 12 – Tubo de Prandtl ou de Pitot duplo [Delmeé, 1982].

Conforme Schneider, 2012, a intensa prática nesse campo experimental já levou a determinar que a geometria mais indicada para a medição de pressão de estagnação é a cilíndrica, que é pouco sensível ao alinhamento com a direção do escoamento. A Figura 13 mostra o comportamento de diferentes montagens da tomada de pressão de estagnação, sempre em um tubo cilíndrico, em relação ao ângulo de ataque formado entre a linha de simetria da sonda e a direção do escoamento.

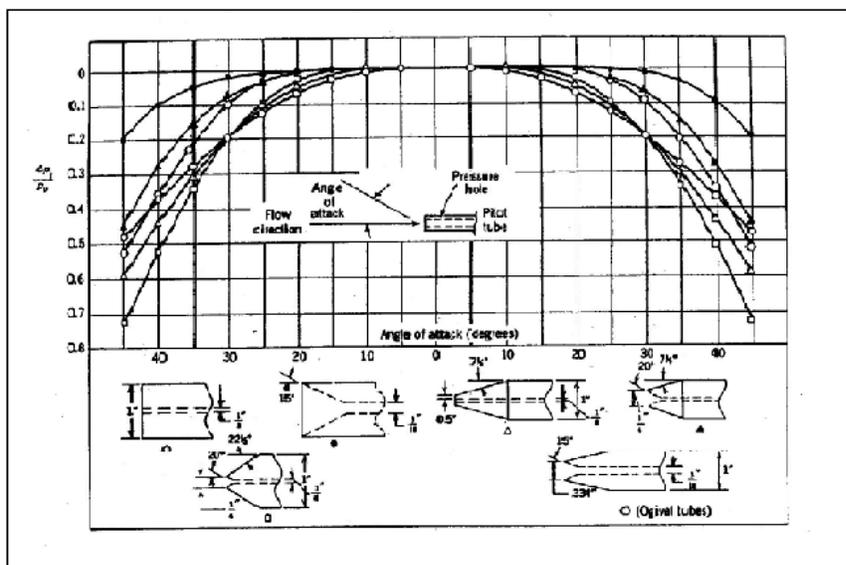


Figura 13 - Correção da pressão de estagnação em função do ângulo de ataque para diferentes sensores cilíndricos [Schneider, 2012].

### 2.3 Metodologia de planejamento e análise de experimentos

Segundo Montgomery, 2001, os métodos de controle estatístico do processo e o planejamento experimental são duas ferramentas muito poderosas para a melhoria e otimização do processo e estão intimamente correlacionadas. O planejamento de experimentos (DOE- “design of experiments”) compreende um conjunto de técnicas estatísticas que proporcionam um método estruturado para planejar, executar e analisar experimentos. Técnicas de planejamento de experimentos, com base estatística, são particularmente úteis no mundo da engenharia, com objetivo de resolver muitos problemas importantes: a descoberta de novos fenômenos básicos que podem levar a novos produtos e a comercialização de nova tecnologia, incluindo desenvolvimento de novos produtos, novos processos e a melhoria de produtos e processos existentes.

O planejamento de experimentos é utilizado para determinar qual a combinação ótima de variáveis para a obtenção da resposta desejada. A resposta é a variável dependente, enquanto que as variáveis que influenciam são as variáveis independentes, denominadas de fatores.

Neste trabalho foi aplicado o planejamento fatorial para análise da influência da vazão total de alimentação de ar e das aberturas dos registros de ar primário e secundário (fatores) sobre a distribuição do ar na caixa de suprimento (resposta).

### 2.3.1 Conceitos básicos de experimentação

Galdámez, 2002, estudou técnicas de planejamento de análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos, para este estudo fez uma revisão profunda dos conceitos básicos de experimentação da seguinte forma:

“...Variáveis de resposta: são variáveis dependentes que sofrem algum efeito nos testes, quando estímulos são introduzidos propositalmente nos fatores que regulam os processos. Nos experimentos, podem existir uma ou mais variáveis de resposta (y) que são importantes de se avaliar...” [Galdámez, 2002].

“...Fatores de controle: estes são fatores alterados deliberadamente no experimento. O objetivo principal de introduzir estímulos nos fatores de controle é avaliar o efeito produzido nas variáveis de resposta e, com isso poder determinar os principais fatores do processo...” [Galdámez, 2002].

“...Níveis dos fatores: são as condições de operação dos fatores de controle investigados nos experimentos. Os níveis são identificados por nível (-1) e nível alto (+1)...” [Galdámez, 2002].

“...Tratamentos: é a combinação dos níveis de fatores de controle, isto significa que cada uma das corridas do experimento representará um tratamento...” [Galdámez, 2002].

“...Efeito principal: é a diferença média observada na resposta quando se muda o nível do fator de controle investigado...” [Galdámez, 2002].

Efeito de interação: este efeito mostra a variação média de um fator em função dos níveis de outros. Este fato se observa nos gráficos de interação de fatores. Quando as retas de interação cruzam-se nos gráficos significa que há interação entre os fatores e quando há paralelismo entre as retas significa que o efeito provocado pela mudança do nível de um determinado fator na resposta é independente do nível de outro fator, portanto não existe interação entre esses fatores [Steinberg e Hunter, 1984].

### 2.3.2 Réplicas, Blocagem e Aleatorização

Dean e Voss, 1999, apresentam três técnicas básicas fundamentais para projetos de experimentos: o uso de réplicas, blocagem e aleatorização.

O uso de réplicas é o processo de repetir cada uma das combinações (linhas) da matriz experimental sob as mesmas condições de experimentação. Segundo Montgomery, 1991, este conceito permite encontrar uma estimativa do erro experimental, que é utilizado para determinar se as diferenças observadas entre os dados são estatisticamente significativas.

Blocagem é a técnica utilizada para controlar e avaliar a variabilidade produzida pelos fatores perturbadores (controláveis ou não-controláveis) dos experimentos. Com esta técnica procura-se criar um experimento (grupo ou unidades experimentais balanceadas) mais homogêneo e aumentar a precisão das respostas que são analisadas.

Aleatorização é o processo de definir a ordem dos tratamentos da matriz experimental, através de sorteios ou por limitações específicas dos testes. Esse conceito também se refere ao processo de alocação do material e equipamento às diferentes condições de experimentação. A aleatorização nos experimentos é realizada para balancear os efeitos produzidos pelos fatores não-controláveis nas respostas analisadas e para se atender aos requisitos dos métodos estatísticos, os quais exigem que os componentes do erro experimental sejam variáveis aleatórias independentes [Chew, 1957].

### *2.3.3 Experimento com ponto central*

Em experimentos fatoriais, é importante verificar se existe um comportamento linear das respostas em relação aos fatores, para se observar se ocorre mudança direta ou inversamente proporcional na resposta quando um fator aumenta ou diminui. Entretanto, é possível que determinada resposta melhore quando um fator é aumentado até certo ponto e depois diminua o desempenho [Macedo, 2007]. Em casos como este, é recomendada a utilização de ponto central, ou seja, um tratamento que admite apenas os níveis médios de cada fator, a fim de se verificar se existe um comportamento diferente daquele que seria esperado para a resposta baseando-se apenas nos dois tratamentos adotados.

Nesse capítulo foram apresentados, de forma sucinta, os fundamentos da mecânica dos fluidos e do projeto de experimentos em que se baseia a metodologia aplicada no desenvolvimento deste trabalho.

Na continuação, será apresentada a metodologia adotada no estudo do campo de velocidades na caixa de alimentação da caldeira de queima frontal.

### 2.3.4 Planejamento fatorial

Calado, 2003, mostra que o planejamento fatorial é uma técnica bastante utilizada quando se tem duas ou mais variáveis independentes (fatores). Ele permite uma combinação de todas as variáveis em todos os níveis, obtendo-se assim uma análise de uma variável, sujeita a todas as combinações das demais. Planejamento fatoriais são extremamente úteis para se medir a influência de uma ou mais variáveis na resposta de um processo. O planejamento fatorial é a única maneira de prever a interação entre fatores. Por um planejamento fatorial em cada tentativa completa ou réplica do experimento, todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores são investigadas [Montgomery e Runger, 2007].

Conforme Macedo, 2007, utiliza-se o planejamento fatorial para o estudo dos efeitos de duas ou mais variáveis de influência. Pode ser classificado como um método do tipo simultâneo, em que as variáveis que apresentam influências significativas na resposta são avaliadas ao mesmo tempo. As variáveis são escolhidas e os experimentos são realizados em diferentes valores destes fatores para todas as combinações possíveis dos níveis de cada variável selecionada. Diz-se que há interação dessas variáveis quando o efeito de uma variável depende do nível das outras variáveis. Quando se estuda o mesmo número de níveis para todos os fatores, o planejamento fatorial pode ser representado por  $b^k$  onde  $k$  é o número de fatores e  $b$  é o número de níveis escolhidos.

É sabido que os experimentos são feitos em todas as áreas científicas e de engenharia e são uma importante parte da maneira de se aprender como os sistemas e processos funcionam. É fato, ainda, que a validade das conclusões obtidas de um experimento depende, em grande parte, de como o experimento é conduzido. Conseqüentemente, o planejamento do experimento desenvolve o papel principal na solução futura do problema que inicialmente motivou o experimento. Neste sentido o experimento fatorial é uma técnica poderosa para esse tipo de problema.

Conforme Galdámez, 2002, um planejamento fatorial com  $k$  fatores, cada um deles com dois níveis, é denominado de planejamento fatorial  $2^k$ . O processo experimental desta metodologia consiste em realizar testes com cada uma das combinações da matriz experimental, para, em seguida, determinar e interpretar os efeitos principais e de interação dos fatores investigados e assim, poder identificar as melhores condições experimentais do produto ou processo de fabricação. Uma das principais vantagens de se utilizar um experimento fatorial  $2^k$  é que através da análise dos experimentos pode-se indicar as

principais tendências e determinar uma direção promissora para as experimentações subsequentes.

Nos planejamentos experimentais em que as variáveis são exploradas em 2 níveis é comum codificá-los usando os sinais (+) e (-). A atribuição destes sinais é feita arbitrariamente, não interferindo na realização dos experimentos ou interpretação dos resultados, além de permitir ilustrar o planejamento sob forma de matrizes de planejamento. Desta forma, a matriz de planejamento para o experimento fatorial  $2^3$  é mostrada na Tabela 3.

Tabela 3– Matriz de planejamento para experimento fatorial  $2^3$  [adaptado de Montgomery e Runger, 2012].

Nº Teste	Combinações dos tratamentos	Fatores do planejamento			Ordem dos testes	Resposta
		X1	X2	X3		
1	(1)	-1	-1	-1	6	$Y_1$
2	A	1	-1	-1	8	$Y_2$
3	B	-1	1	-1	1	$Y_3$
4	AB	1	1	-1	2	$Y_4$
5	C	-1	-1	1	5	$Y_5$
6	AC	1	-1	1	3	$Y_6$
7	BC	-1	1	1	4	$Y_7$
8	ABC	1	1	1	7	$Y_8$

#### 2.3.4.1 Análise estatística do modelo

A metodologia fatorial utiliza um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas que são utilizadas para modelar e analisar problemas nos quais a resposta de interesse é influenciada por muitas variáveis e nos quais a resposta deva alcançar um valor ótimo [Myers e Montgomery, 2002]. Este método é adequada quando se tem um bom conhecimento do processo estudado e se deseja otimizá-lo. Isto significa que deve ser utilizado um número pequeno de fatores (2-3) nas construções de seus modelos [Chandra, 2001; Montgomery e Runger, 2007; Mason *et al.*, 2003]. Usualmente, um polinômio de baixa ordem para qualquer região de interesse é empregado. Sendo a resposta modelada por uma função linear das variáveis independentes, então a função de aproximação será o modelo de primeira ordem. Conforme Montgomery, 1991, o modelo estatístico do planejamento fatorial  $2^3$  é dado pela Eq. 2.7:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijk} \quad (2.7)$$

Na Equação 2.24,

$y_{ijk}$  é a variável resposta

$\mu$  é a média dos resultados

$\tau_i$  é o efeito principal do fator X1

$\beta_j$  é o efeito principal do fator X2

$\gamma_k$  é o efeito principal do fator X3

$(\tau\beta)_{ij}$  é o efeito de interação entre os fatores X1 e X2

$(\tau\gamma)_{ik}$  é o efeito de interação entre os fatores X1 e X3

$(\beta\gamma)_{jk}$  é o efeito de interação entre os fatores X2 e X3

$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$  é o efeito de interação entre os fatores X1, X2 e X3

$\varepsilon_{ijk}$  é o erro experimental.

A estatística de avaliação deste modelo é análise de variância (ANOVA), que utiliza-se para verificar se os efeitos são significativos nas respostas. A análise de variância é também utilizada para testar hipóteses sobre os efeitos principais dos fatores e a interação entre eles. Para averiguação do valor crítico da estatística de teste deve-se desenvolver as hipóteses dos experimentos em uma estatística específica calculada com base em um determinado resultado de amostra. Levine *et alli*, 1998 e Montgomery, 1991, (*apud* Galdámez, 2002), mostram diversas distribuições estatísticas, dentre elas: *t*-student, *F*-Fischer e *Z*-standard. Para os experimentos realizados nesta dissertação será utilizada a distribuição *F*.

Matematicamente com os dados analisados é possível rejeitar ou aceitar estas hipóteses.

Com este propósito é realizado um teste de hipóteses em que a hipótese nula, hipótese que se diz ser verdadeira, pressupõem que todos os tratamentos tenham médias iguais ( $H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \dots = \mu_k$ ) e que todos os experimentos dos tratamentos tem a mesma variância. A hipótese alternativa (hipótese do pesquisador,  $H_1$ ) é de que pelo menos um par de médias seja diferente ( $H_1 = \mu_p \neq \mu_q, p \neq q$ ). O teste verdade consiste em comparar as variâncias entre tratamentos e dentro dos tratamentos (residual), pois se  $H_0$  for falso haverá uma tendência de

que a variância total e a entre os tratamentos superestimem a variância populacional, e se  $H_0$  for verdadeiro, as variâncias total, entre tratamentos e residual tendem a serem boas estimativas do parâmetro.

Galdámez, 2002, observa que ao utilizar um método estatístico para se concluir sobre o resultado experimentos industriais podem ser cometidos dois tipos de erros na análise estatística. O primeiro erro (erro tipo I) ocorre se a hipótese nula for rejeitada sendo ela verdadeira, a probabilidade de cometer este erro é  $\alpha$ , denominado nível de significância do testes. O erro tipo II é aceitar  $H_0$ , sendo esta falsa.

No teste estatístico a probabilidade de se cometer o erro tipo I é identificado como o nível de significância ( $\alpha$ ). De uma maneira geral, pode-se controlar a probabilidade do erro tipo I decidindo o nível de risco  $\alpha$  que admite-se tolerar.

Levine *et alli*, 1998, Devor *et alli*, 1992 e Montgomery, 1991, (apud Galdámez, 2002) recomendam que os pesquisadores devem selecionar os níveis de  $\alpha$  em um valor menor ou igual a 0,1. Desta forma os valores críticos que dividem as regiões de rejeição e não rejeição podem ser determinados.

Assumindo que os fatores A, B e C são fixos, a tabela da análise da variância é mostrada na Tabela 4. O teste  $F$  sobre os efeitos principais e interações decorrem diretamente dos quadrados médios esperados.

Tabela 4 – Análise de variância para um modelo de três fatores fixos [adaptado de Montgomery, 2001].

Fonte de variação	Graus de Liberdade	Soma Quadrado	Quadrado Médio	$F_0$
A	$a-1$	$SQ_A$	$QM_A$	$F_0=QM_A/QM_E$
B	$b-1$	$SQ_B$	$QM_B$	$F_0=QM_B/QM_E$
C	$c-1$	$SQ_C$	$QM_C$	$F_0=QM_C/QM_E$
AB	$(a-1)(b-1)$	$SQ_{AB}$	$QM_{AB}$	$F_0=QM_{AB}/QM_E$
AC	$(a-1)(c-1)$	$SQ_{AC}$	$QM_{AC}$	$F_0=QM_{AC}/QM_E$
BC	$(b-1)(c-1)$	$SQ_{BC}$	$QM_{BC}$	$F_0=QM_{BC}/QM_E$
ABC	$(a-1)(b-1)(c-1)$	$SQ_{ABC}$	$QM_{ABC}$	$F_0=QM_{ABC}/QM_E$
Erro	$abc(n-1)$	$SS_E$	$QM_E$	
Total	$abcn-1$	$SS_T$		

Geralmente, a análise de variância é feita utilizando um pacote de software estatístico que além dessa vantagem inclui o valor  $p$ . Esse valor corresponde a região sob a qual a estatística  $F$  é limite da razão  $F_0$  calculada.

Desta forma, “...com esse parâmetro estatístico é possível concluir sobre as hipóteses nulas sem precisar recorrer a uma tabela de valores críticos da distribuição  $F$ . Isto é, se o valor  $p$  for menor que o nível de significância escolhido  $\alpha$ , a hipótese nula é rejeitada...” [Galdámez, 2002]

No entanto, as fórmulas de cálculo para a soma dos quadrados, quadrado médio, teste  $F_0$  para verificar a presença de interação são ocasionalmente útil. Sugere-se Montgomery, 2001, para verificar os cálculos destas variáveis (graus de liberdade, soma dos quadrados, quadrado médio e teste estatístico  $F_0$ ).

### 3 MATERIAS E MÉTODOS

Neste capítulo é feita a descrição do procedimento experimental e equipamentos utilizados, incluindo a descrição dos aparatos de teste e da a instrumentação associada.

#### 3.1 Instrumentação cativa da caldeira

O registro das variáveis de processo de interesse no trabalho (temperatura do ar, pressão na caixa de ar e produção de vapor) foi feito através do sistema de aquisição de dados ligado ao painel de instrumentos dos equipamentos. Para fazer a coleta de dados, foi utilizado o “software” Aspen (supervisório da unidade) que se comunica com o sistema digital de controle distribuído por todas as unidades da empresa. Esse “software” armazena os dados e faz as médias das variáveis a cada intervalo de 5 minutos. A Tabela 5 mostra os transdutores da instrumentação cativa da caldeira que foram utilizados nas medições de temperatura, vazão e pressão nos sistemas de ar de combustão e produção de vapor.

Tabela 5 - Instrumentação cativa da caldeira.

Instrumento	Tipo de transdutor	Tipo de sensor	Incerteza	Identificação do transdutor
Pressão de ar na entrada do regenerativo	Eletrônico	Célula Capacitiva	0,04% +/-	46PT409.1
Pressão na caixa de ar	Eletrônico	Célula Capacitiva	0,04% +/-	46PT409.2
Pressão na fornalha	Eletrônico	Célula Capacitiva	0,04% +/-	46PT409.3
Pressão de gases na saída da caldeira	Eletrônico	Célula Capacitiva	0,04% +/-	46PT409.4
Pressão de ar na saída do regenerativo	Eletrônico	Célula Capacitiva	0,04% +/-	46PT409.5
Vazão de vapor	Eletrônico	Placa Orificio	0,04% +/-	46FT405
Temperatura de ar	Tipo K	Termopar	0,075% +/-	46TI407.5

#### 3.2 Medidas de temperatura na parede externa da fornalha

Para inserção, sustentação e isolamento térmico dos termopares utilizados para medição da temperatura das paredes da caldeira foram instalados “conduítes” em oito pontos da câmara de combustão, pelo lado externo. Cada conduíte consiste em um tubo de 3mm de diâmetro com 150 mm de comprimento, soldado (solda de topo) a 45° na aleta da parede d'água, como mostrado na Figura 14a. Cada conduíte foi isolado com lã de rocha (conforme especificações das NBR's 11363, 11364 e 13047), como pode ser visto na Figura 14b.



Figura 14a - Fixação do condúite de termopar na aleta da parede d'água.



Figura 14b - Isolamento do condúite de termopar com lã de rocha.

Seis tubos foram posicionados a uma distância de 2 m da parede frontal nos três níveis de queimadores da caldeira. Os outros dois foram posicionados a distância de 4 m e instalados somente no alinhamento dos queimadores superiores da caldeira (queimadores 1,2 e 3), conforme pode ser observado através da Figura15.

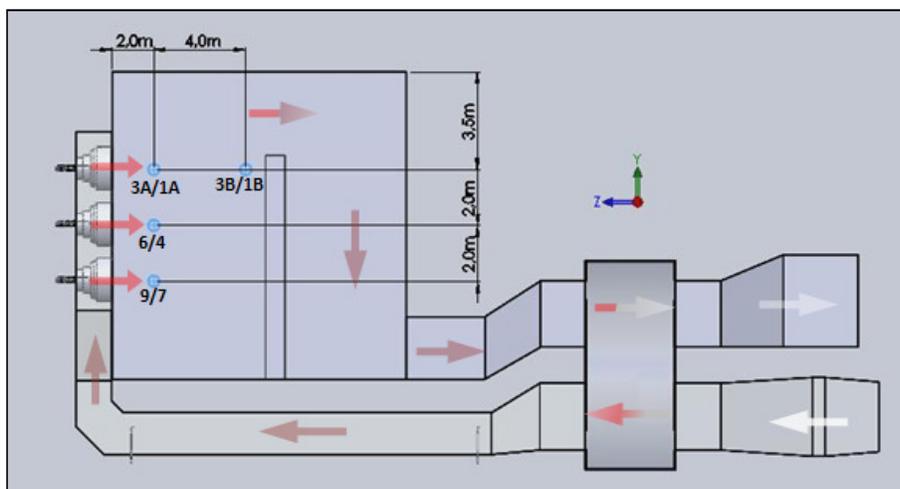


Figura 15 - Distribuição dos termopares nas paredes externa da fornalha.

### 3.3 Sondas de medição de pressão estática e estagnação

Foram instaladas sondas para medição de pressão em três regiões distintas da caixa de ar da caldeira. Na primeira região de escoamento do ar de combustão, trecho horizontal embaixo da caldeira, logo após a saída de ar do trocador de calor, foram instaladas sondas de pressão de estagnação.

Foram instaladas oito sondas de estagnação divididas em duas seções do duto. A primeira seção foi instalada a uma distância de 4,70 m a jusante do trocador de calor tipo regenerativo e a segunda a uma distância de 13,70 m. A Figura 16 mostra o posicionamento das sondas no trecho horizontal da caixa de ar.

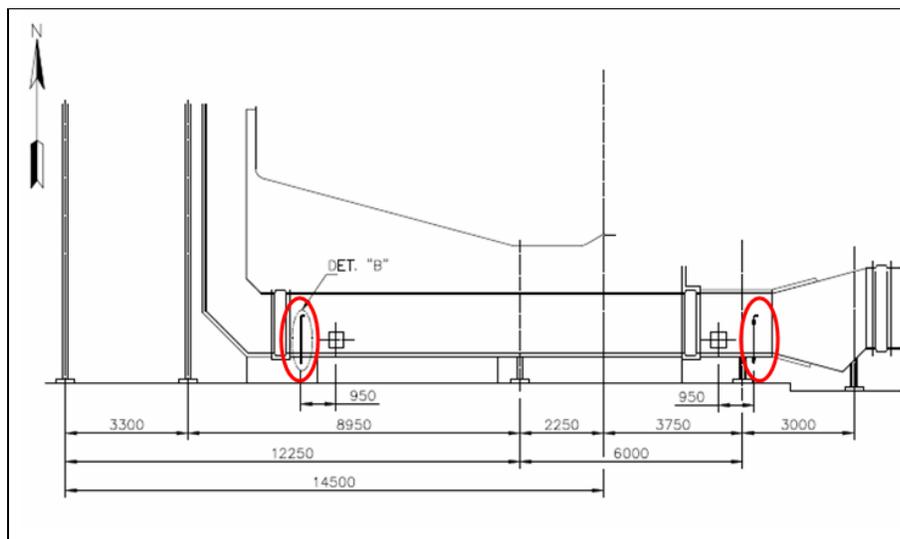


Figura 16 - Posicionamento das sondas de estagnação no trecho horizontal da caixa de ar.

As sondas foram construídas com um tubo aço (A-106), diâmetro  $\frac{1}{2}$ ", para fixação na parede inferior do duto, encamisado internamente com um tubo de aço inox, diâmetro de  $\frac{1}{4}$ ", com a ponta curvada em  $90^\circ$  inserida até a metade da altura do duto, os detalhes construtivos da sonda podem ser vistos através da Figura 17.

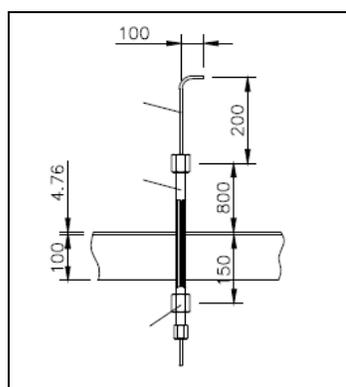


Figura 17 - Detalhes construtivos e de instalação das sondas de estagnação.

Em cada seção do trecho horizontal da caldeira foram instaladas quatro sondas, distantes entre si de 1,10 m, conforme pode ser visto na Figura 18.

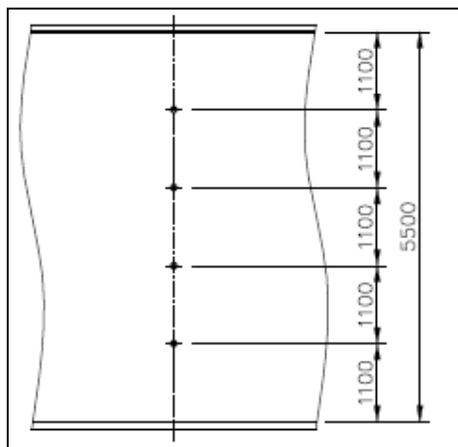


Figura 18 - Distância lateral entre as sondas na secção do duto horizontal.

A segunda região onde foram instaladas as sondas foi o trecho vertical na região frontal da caldeira. Nesta região foram instalados 12 pontos de tomadas duplas, para medição das pressões estática e de estagnação da caixa de suprimento de ar dos 9 queimadores do gerador de vapor. Detalhe desta instalação pode ser visto na Figura 19.



Figura 19 - Distribuição das sondas de estagnação e estática no trecho vertical da caixa de ar.

Cada sonda de pressão estática constitui-se de um tubo instalado junto à parede com diâmetro de nominal de  $\frac{1}{4}$ ", encamisado com um tubo de aço carbono (A-106 B) com luvas redutoras para conexão dos instrumentos de medição. Em cada nível de queimadores foram instaladas quatro tomadas de pressão estática, sendo duas delas na metade da distância entre centros dos queimadores e as duas laterais a uma mesma distância das paredes laterais da caixa de ar.

Os acessos das sondas de pressão de estagnação foram confeccionados 100 mm acima de cada tomada de pressão estática, no trecho vertical de caixa de ar de modo que a extremidade destas sondas estivesse alinhada com a tomada de pressão estática, formando um tubo de Pitot como mostrado na Figura 20.

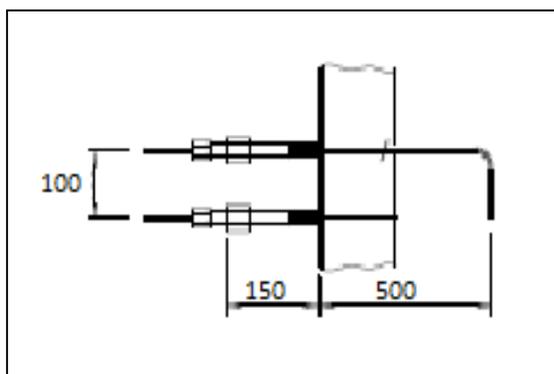


Figura 20 - Montagem das sondas de estagnação e estática no trecho vertical.

Direção do escoamento é ascendente.

Adicionalmente sondas de pressão estática foram instaladas em dutos previamente existentes nas câmaras de ar primário e de ar secundário dos queimadores. A Figura 21 apresenta uma vista superior de um queimador, indicando o posicionamento dessas sondas nas câmaras de ar primário e secundário.

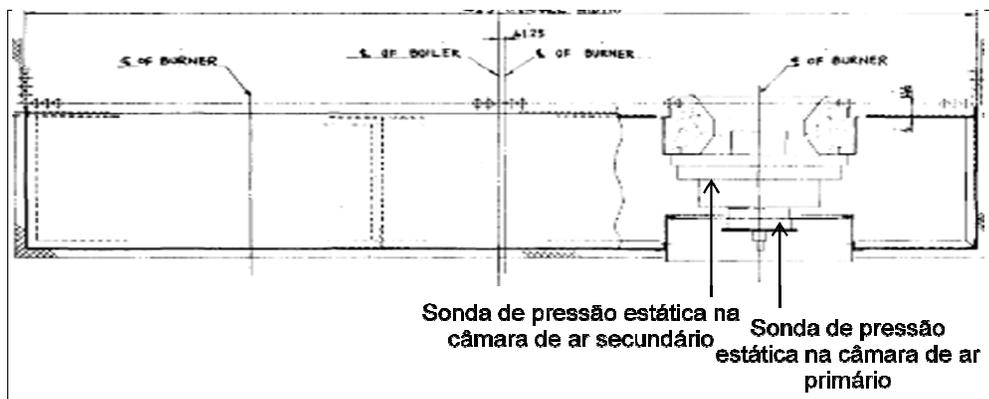


Figura 21 – Posicionamento das sondas de pressão estática nos queimadores.

### 3.4 Procedimentos de medição de pressão e temperatura

Para medição de pressão, as coletas de campo foram feitas através de manômetro de coluna d'água e/ou manômetro digital. A temperatura foi medida através de termopar.

#### 3.4.1 Pressão dinâmica no trecho vertical da caixa de ar

Em cada teste, a pressão dinâmica no trecho vertical da caixa de ar foi medida varrendo-se os pontos de medição de P1 a P12, isto é, ao longo de cada plano horizontal, do lado leste para lado oeste.

A leitura de pressão dinâmica em cada ponto foi feita tomando-se 7 medidas, a intervalos de 20 segundos entre cada leitura, durante 140 s, obtendo-se a pressão nos terminais de um manômetro de tubo em U inclinado, mostrado na Figura 22. A pressão dinâmica em cada ponto corresponde à média dessas leituras.



Figura 22 – Manômetro de tubo em U inclinado.

### 3.4.2 Pressão de estagnação no trecho horizontal

A leitura de pressão de estagnação em cada ponto foi feita tomando-se 6 medidas, a intervalos de 20 segundos, da pressão medida em manômetro digita. A pressão de estagnação em cada ponto corresponde à média dessas leituras.

### 3.4.3 Medição de temperatura

Para fazer-se as medidas de temperatura utilizou-se um termopar tipo K (chromel-alumel) encostando-se o elemento primário na aleta da parede. Para leitura foi utilizado um multicalibrador de fabricação UnoMatch.

A leitura em cada ponto foi feita tomando-se a medida após a estabilização de indicação de temperatura no sensor digital. O tempo de estabilização típico nestes experimentos foi da ordem de 2 minutos.

## 3.5 Planejamento fatorial

Sabendo-se que as variáveis operacionais mais importantes envolvidas neste processo e que poderiam ser mantidas controladas em qualquer regime de operação da caldeira são: abertura do registro de sucção do ventilador de ar para combustão, as aberturas dos registros de ar primário e de ar secundário dos queimadores, decidiu-se verificar a influência destes parâmetros (variáveis controláveis) no campo de velocidades da região de suprimento de ar para os queimadores (região vertical). O experimento foi realizado segundo um planejamento fatorial completo  $2^3$ , utilizando os níveis das variáveis mostrados na Tabela 6. Os valores dos níveis de cada fator foram escolhidos por serem valores factíveis de repetição para caldeira em operação.

Tabela 6 – Níveis de valores dos parâmetros adotados.

Fator	Nível mínimo (-1)	Nível máximo (+1)
X1 = <i>Damper</i> do ventilador(%)	30	70
X2 = <i>Damper</i> do ar primário (%)	80	100
X3 = <i>Damper</i> do ar secundário (%)	40	100

O experimento simulou o regime operacional da caldeira com todos os queimadores operando, variando-se a abertura dos registros de ar primário e de ar secundário conforme as combinações previstas. Foram realizadas duas réplicas para cada experimento com 7 coletas para cada combinação. Adicionalmente, foram realizados 2 ensaios no ponto central, com o objetivo de estimar o erro experimental e testar a linearidade do modelo. Durante os experimentos, foram feitas leituras a cada 20 s, para acompanhamento do processo. A análise estatística dos dados obtidos foi realizada utilizando-se o programa MINITAB versão 16.

Combinando os diversos níveis das variáveis controladas, foram definidas, utilizando o MINITAB, a ordem e as condições operacionais dos testes, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Condições paramétricas dos experimentos.

Ensaio	Variáveis controladas		
	Damper VT	Damper de Ar Primário	Damper de Ar Secundário
1	30	100	100
2	30	80	40
3	30	80	40
4	30	100	40
5	30	100	100
6	70	80	40
7	70	100	40
8	70	80	100
9	30	80	100
10	50	90	70
11	70	100	100
12	70	100	100
13	70	100	40
14	70	80	40
15	30	100	40
16	50	90	70
17	70	80	100
18	30	80	100

Para cada combinação apresentada na Tabela 7, foram coletadas 7 amostras para cada um dos doze pontos de medida e lançada a média de cada ponto para cálculo do modelo por ponto.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo, inicialmente, verificar-se-á o comportamento da velocidade do ar na alimentação dos queimadores, correlacionando com a configuração operacional (acesos ou apagados), ditada pela condição de processo da caldeira. Também serão feitas considerações em relação ao comportamento das pressões estáticas, estagnação e temperaturas das paredes laterais da caldeira. Por último é feita a análise dos testes realizados com base no planejamento fatorial de experimentos.

### 4.1 Condições de operação nos testes

Os experimentos foram realizados na caldeira 1 da Braskem no período de março a setembro de 2012. Foram feitos 51 experimentos no ano de 2012 em dias, horários e condições operacionais diferentes com a finalidade de possibilitar fazer uma análise em situações distintas.

Os testes foram realizados com a caldeira em operação, isto é, com geração de vapor, condição denominada “a quente” (testes 1 a 7), ou sem geração de vapor, condição denominada “a frio” (testes 8 a 14). A Tabela 8 apresenta as condições operacionais dos 14 testes.

Na Tabela 8, X1 corresponde à abertura do registro do ventilador de ar, X2 e X3 indicam a abertura dos registros das câmaras de ar primário e secundário, respectivamente, nos nove queimadores.

A designação das aberturas dos registros por X1, X2 e X3 atende uma necessidade da notação utilizada no planejamento de experimentos. Deve-se ressaltar que nos 14 testes indicados na Tabela 8, os registros de ar primário e secundário foram mantidos totalmente abertos (100%) nos queimadores acesos, ou totalmente fechados (0%), nos queimadores apagados.

Tabela 8 - Resumo dos experimentos realizados com a caldeira acesa e apagada.

Teste	Denominação	Data	Condição Operacional da Caldeira					
			Vazão de vapor (ton/h)	Combustível	Queimadores abertos	Abertura dos dampers	Temp. de ar (°C)	Pressão de ar (mmca)
1	A quente	17/3	89,9	Óleo 2, gás 2+4 e gás 1	1, 2, 3, 5, 7, 8, 9 <sup>(1)</sup>	X1(30%), X2 E X3(100%)	231,07	94,41
2	A quente	17/3	149,9	Óleo 2, gás 2+4 e gás 1	Todos <sup>(2)</sup>	X1(34%), X2 E X3(100%)	239,86	127,07
3	A quente	23/3	144,2	Todos, exacto gás 2+4	Todos <sup>(3)</sup>	X1(34%), X2 E X3(100%)	239,28	126,7
4	A quente	23/3	199	Todos, exacto gás 2+4	Todos <sup>(4)</sup>	X1(44%), X2 E X3(100%)	252,65	263,1
5	A quente	23/3	101,9	Óleo 2, gás 2+4 e gás 1	1, 3, 4, 6, 7, 8, 9 <sup>(5)</sup>	X1(31%), X2 E X3(100%)	230,07	95,68
6	A quente	28/3	121,3	Óleo 2, gás 2+4 e gás 1	1, 3, 5, 7, 8, 9 <sup>(6)</sup>	X1(29%), X2 E X3(100%)	233,12	95,9
7	A quente	29/3	147,13	Todos	Todos <sup>(7)</sup>	X1(35%), X2 E X3(100%)	241,02	137,23
8	A frio	16/4	-	-	1, 4, 7 (coluna 1)	X1(35%), X2 E X3(100%)	144,03	143,08
9	A frio	16/4	-	-	2, 5, 8 (coluna 2)	X1(35%), X2 E X3(100%)	143,25	145,97
10	A frio	16/4	-	-	3, 6, 9 (coluna 3)	X1(35%), X2 E X3(100%)	135,21	150,36
11	A frio	20/4	-	-	1, 2, 3, 5, 7, 8 e 9	X1(38%), X2 E X3(100%)	134,09	145,72
12	A frio	20/4	-	-	1, 3, 5, 7, 8 e 9	X1(38%), X2 E X3(100%)	124,76	143,67
13	A frio	20/4	-	-	Todos	X1(40%), X2 E X3(100%)	125,48	139,11
14	A frio	20/4	-	-	1, 3, 4, 6, 7, 8 e 9	X1(38%), X2 E X3(100%)	118,33	142,22

Assim, o detalhamento das informações na sexta coluna (queimadores acesos) da Tabela 8 é:

Teste 1: Queimadores 1, 2, 3 e 5 com óleo tipo 2; queimadores 7 e 9 com gás combustível e queimador 8 com gás vinil acetileno

Teste 2: Queimadores de 1 a 6 com óleo tipo 2; queimadores 7 e 9 com gás combustível e queimador 8 com gás vinil acetileno

Teste 3: Queimadores 1, 3, 4 e 6 com óleo 2; queimadores 2 e 5 com óleo 3A; queimadores 7 e 9 com gás combustível e queimador 8 com gás vinil acetileno e gás combustível.

Teste 4: Queimadores 1, 3, 4 e 6 com óleo 2; queimador 2 e 5 com óleo tipo 3A e queimadores 7,8 e 9 com gás combustível.

Teste 5: Queimadores 1, 3, 4 e 6 com óleo 2; queimadores 7 e 9 com gás combustível e queimador 8 com gás vinil acetileno e gás combustível.

Teste 6: Queimadores 1, 3 e 5 com óleo 2; queimadores 7 e 9 com gás combustível. Queimador 8 com gás vinil acetileno e gás combustível.

Teste 7: Queimadores 1, 3, 4, e 6 com óleo 2; queimadores 2 e 5 com óleo tipo 3A; queimadores 7 e 9 com gás combustível e queimador 8 com gás vinil acetileno e gás combustível.

Uma terceira seqüência de 36 experimentos (testes de 15 a 51) foi realizada com a caldeira “a frio”. Estes testes se caracterizam pela combinação das variáveis de controle (abertura do registro de ar do ventilador, abertura do registro das câmaras de ar primário e secundário) de acordo com o método de planejamento de experimentos conforme apresentado na secção 3.5. A Tabela 9 apresenta a condição operacional da caldeira destes testes.

Tabela 9 – Resumo dos experimentos realizados com a metodologia fatorial.

Teste	Denominação	Data	Condição Operacional da Caldeira			
			Queimadores abertos	Abertura registros VT/PRIM/SEC	Temp. de ar (°C)	Pressão de ar (mmca)
15	MF	05/jun	Todos	30%, 80% e 100%	142,1	71,4
16	MF	05/jun	Todos	30%, 80% e 40%	135,5	79,4
17	MF	05/jun	Todos	30%, 100% e 40%	136,9	76,0
18	MF	06/jun	Todos	30%, 100% e 100%	131,4	66,9
19	MF	06/jun	Todos	70%, 80% e 100%	110,0	364,7
20	MF	06/jun	Todos	70%, 80% e 40%	93,1	371,5
21	MF	06/jun	Todos	70%, 100% e 40%	102,4	359,6
22	MF	06/jun	Todos	70%, 100% e 100%	96,0	324,7
23	MF	14/jun	Todos	30%, 80% e 100%	164,2	63,9
24	MF	14/jun	Todos	30%, 80% e 40%	150,7	76,3
25	MF	14/jun	Todos	30%, 100% e 40%	147,1	75,9
26	MF	14/jun	Todos	30%, 100% e 100%	144,0	76,2
27	MF	14/jun	Todos	70%, 80% e 100%	108,3	329,3
28	MF	14/jun	Todos	70%, 80% e 40%	96,7	370,5
29	MF	14/jun	Todos	70%, 100% e 40%	101,5	355,3
30	MF	14/jun	Todos	70%, 100% e 100%	103,5	333,2
31	MF	11/jun	1, 3, 5, 7, 8 e 9	30%, 80% e 100%	157,0	78,4
32	MF	11/jun	1, 3, 5, 7, 8 e 9	30%, 80% e 40%	148,0	94,1
33	MF	11/jun	1, 3, 5, 7, 8 e 9	30%, 100% e 40%	144,4	97,4
34	MF	11/jun	1, 3, 5, 7, 8 e 9	30%, 100% e 100%	141,4	83,8
35	MF	11/jun	1, 3, 5, 7, 8 e 9	70%, 80% e 100%	113,2	373,7
36	MF	11/jun	1, 3, 5, 7, 8 e 9	70%, 80% e 40%	124,4	425,1
37	MF	11/jun	1, 3, 5, 7, 8 e 9	70%, 100% e 40%	102,9	428,0
38	MF	11/jun	1, 3, 5, 7, 8 e 9	70%, 100% e 100%	114,3	392,0
39	MF	15/jun	1, 3, 5, 7, 8 e 9	30%, 80% e 100%	136,3	80,0
40	MF	15/jun	1, 3, 5, 7, 8 e 9	30%, 80% e 40%	137,4	91,8
41	MF	15/jun	1, 3, 5, 7, 8 e 9	30%, 100% e 40%	139,9	92,3
42	MF	15/jun	1, 3, 5, 7, 8 e 9	30%, 100% e 100%	141,6	86,1
43	MF	15/jun	1, 3, 5, 7, 8 e 9	70%, 80% e 100%	118,2	367,1
44	MF	15/jun	1, 3, 5, 7, 8 e 9	70%, 80% e 40%	121,5	435,6
45	MF	15/jun	1, 3, 5, 7, 8 e 9	70%, 100% e 40%	113,2	423,4
46	MF	15/jun	1, 3, 5, 7, 8 e 9	70%, 100% e 100%	108,8	381,0
47	MF	01/out	todos	50%, 90% e 70%	83,7	247,0
48	MF	01/out	Todos	50%, 90% e 70%	81,7	231,6
49	MF	01/out	1, 3, 5, 7, 8 e 9	50%, 90% e 70%	81,5	269,3
50	MF	01/out	1, 3, 5, 7, 8 e 9	50%, 90% e 70%	80,9	269,5
51	VM	04/out	Todos	60%, 100% e 60%	116,2	317,9

Observação: MF significa metodologia fatorial. VM refere-se a teste de validação do modelo.

#### 4.2 Análise dos experimentos com a caldeira em operação com geração de vapor

A primeira etapa do estudo teve como objetivo avaliar as pressões e velocidades na região de ar e as temperaturas em diferentes regiões da fornalha. Esta etapa constou de testes realizados em várias condições operacionais e diferentes configurações de queimadores acessos. Neste primeiro momento teve-se como objetivo analisar o comportamento das temperaturas nas regiões laterais externas da fornalha, próxima de alguns queimadores, pois havia um relato operacional da percepção de temperaturas externas muito altas em algumas regiões da caldeira.

As variáveis operacionais que foram mantidas constantes durante esta etapa foram: produção de vapor, vazão de ar, temperatura do ar, pressão na caixa de ar e teor de oxigênio medido na fornalha. Para fazer a coleta destes dados, utilizou-se o *software* Aspen (sistema supervisor da empresa) que coletou os dados dos elementos primários da instrumentação cativa da caldeira. Utilizou-se o período de 2 horas para ter-se a média das variáveis coletadas a cada 5 minutos.

Nestes testes, a distribuição de queimadores acesos atendem a restrição de simetria em relação ao plano médio vertical da caixa de ar (e da caldeira), que contém os eixos da coluna central de queimadores (Q2, Q5 e Q8).

As demais variáveis medidas foram pressão estática e pressão de estagnação do ar em 12 pontos na face frontal da caixa de ar. Um primeiro objetivo foi observar o comportamento das velocidades do ar nas regiões próximas a entradas de ar para os queimadores.

No primeiro teste foi utilizado um manômetro digital e coletado o valor máximo de pressão observado em um intervalo de 1 minuto. Este teste foi realizado em condições normais de operação da caldeira, mantendo-se fixas durante 1 hora e quarenta e cinco minutos a produção de vapor vazão de ar total, temperatura do ar, pressão total da caixa de ar e teor de O<sub>2</sub> na fornalha. A Tabela 10 apresenta a condição operacional deste teste.

Tabela 10 - Variáveis de processo mantidas fixas durante o teste 1.

Produção de vapor (ton/h)	Temperatura de ar (°C)	Pressão de ar (mmca)	O <sub>2</sub>
89,9	231,07	94,41	8,19

A caldeira operou com os queimadores 1, 2, 3 e 5 acesos, com óleo, os queimadores 7 e 9 acesos, com gás combustível, o queimador 8 aceso, com gás vinil acetileno, e os queimadores 4 e 6 apagados, como mostrado na Figura 23.

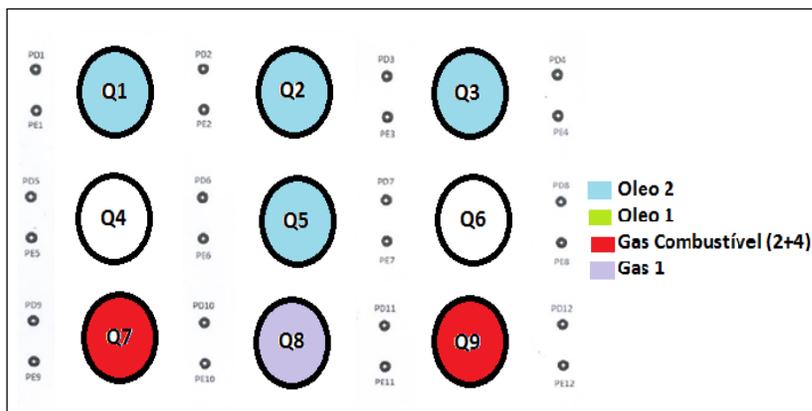


Figura 23 - Queimadores acesos durante o teste 1.

A pressão dinâmica medida nos doze pontos é apresentada na Figura 24.

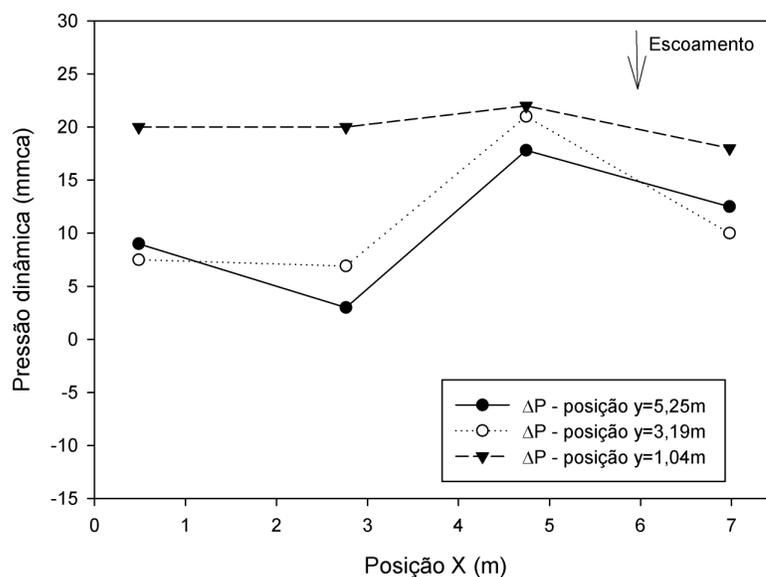


Figura 24 – Pressão dinâmica ao longo do trecho vertical da caixa de ar, nas condições do teste 1. A seta indica o sentido do escoamento.

Verifica-se na Figura 24 que a pressão dinâmica varia ao longo das direções vertical e horizontal. Conforme esperado, a pressão dinâmica (i.e., a velocidade) diminui conforme a corrente de ar ascendente na caixa de ar. Isto não é observado apenas nos pontos 1 e 4, situado nas laterais da primeira linha de queimadores. Nos planos horizontais, era esperado que a pressão dinâmica apresentasse simetria em relação ao plano médio da caixa de ar, o que não se verificou.

Embora os resultados de pressão dinâmica indiquem um nível de velocidade mais alto ao longo da coluna de queimadores 3-6-9 que ao longo da coluna do outro lado, 1-4-7, observa-se que a velocidade permanece aproximadamente constante entre os queimadores da segunda linha (4 e 6), que estavam apagados, e da primeira linha de queimadores (1 e 3, respectivamente acima dos queimadores 4 e 6).

A pressão estática medida nas câmaras de ar primário e secundário dos queimadores, é apresentada na Figura 25.

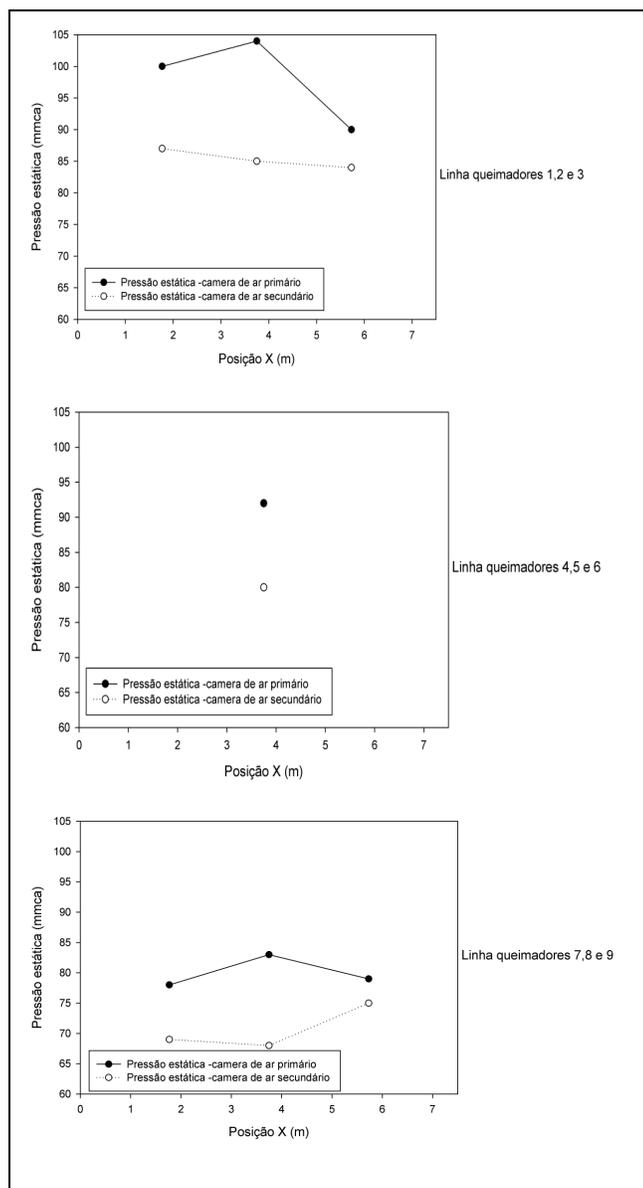


Figura 25 - Pressão estática nas câmaras de ar primário e secundário dos queimadores em operação no teste 1.

Observa-se que a pressão estática é mais alta na região de ar primário que na de ar secundário em todos os queimadores. Este comportamento indica que a velocidade no ar primário é maior que no secundário.

Os resultados obtidos no trecho horizontal da caixa de ar a jusante do trocador regenerativo, são apresentados na Figura 26.

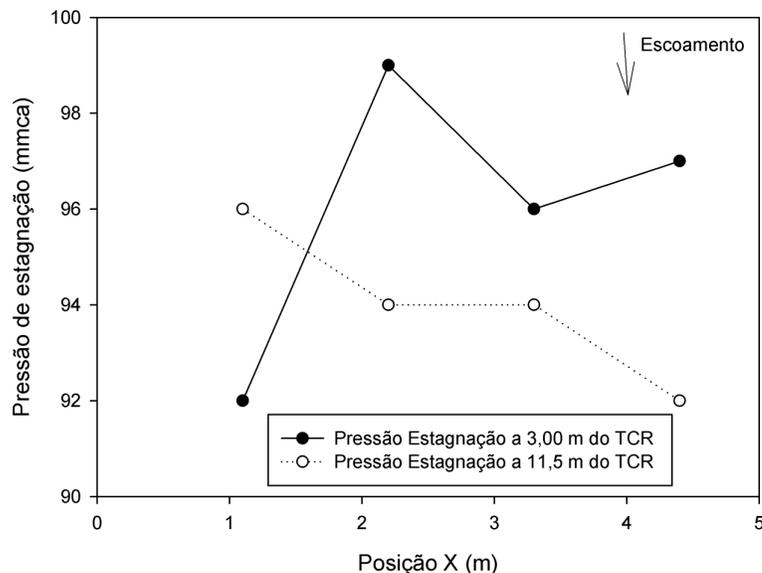


Figura 26 - Pressão de estagnação no duto horizontal, a jusante do trocador de calor tipo regenerativo (TCR), teste 1.

Observa-se que a variação de pressão ao longo do duto horizontal é pequena. Com a pressões levemente superiores na região mais próxima do regenerativo, com era de se esperar em função da perda de carga por interferência ao longo do duto de escoamento.

A temperatura medida nas aletas das paredes d'água é apresentada na Figura 27.

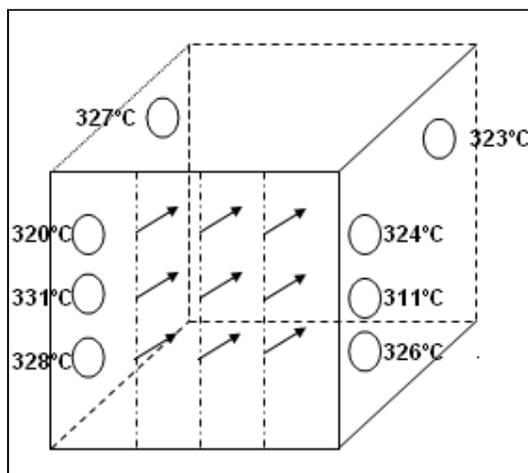


Figura 27 - Temperatura nas paredes laterais da caldeira, no teste 1. A parede oeste situa-se à direita, a leste à esquerda.

Não foram observadas diferenças substanciais da temperatura nos oitos pontos de medição instalados nas paredes leste e oeste durante a realização do teste. Apenas uma leve tendência superior na parede leste, mais próximo do queimador 4 (apagado), em relação ao mesmo ponto do lado oeste, onde o queimador correspondente, queimador 6 também estava apagado.

O segundo teste foi realizado com uma condição operacional de produção de vapor mais elevada em relação ao teste 1, mantendo-se fixas durante 1 hora e trinta e cinco minutos a produção de vapor, vazão de ar total, temperatura do ar, pressão total da caixa de ar e teor de O<sub>2</sub> na fornalha. A Tabela 11 apresenta a condição operacional deste teste.

Tabela 11 - Variáveis de processo mantidas fixas durante o teste 2.

Produção de vapor (ton/h)	Temperatura de ar (°C)	Pressão de ar (mmca)	O <sub>2</sub>
149,9	239,86	127,07	3,12

A caldeira operou com os queimadores 1, 2, 3, 4, 5 e 6 acesos, com óleo, os queimadores 7 e 9 acesos, com gás combustível e o queimador 8 aceso, com gás vinil acetileno, como mostrado esquematicamente na Figura 28.

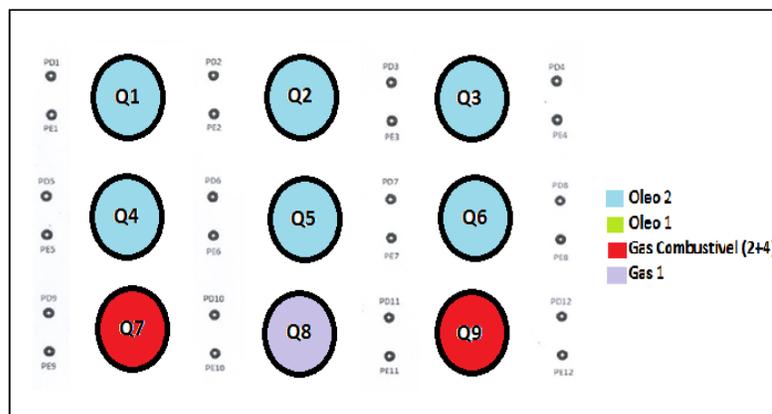


Figura 28 - Configuração dos queimadores no teste 2.

A Figura 29 apresenta os resultados da medição da pressão dinâmica no trecho vertical da caixa de ar no teste 2.

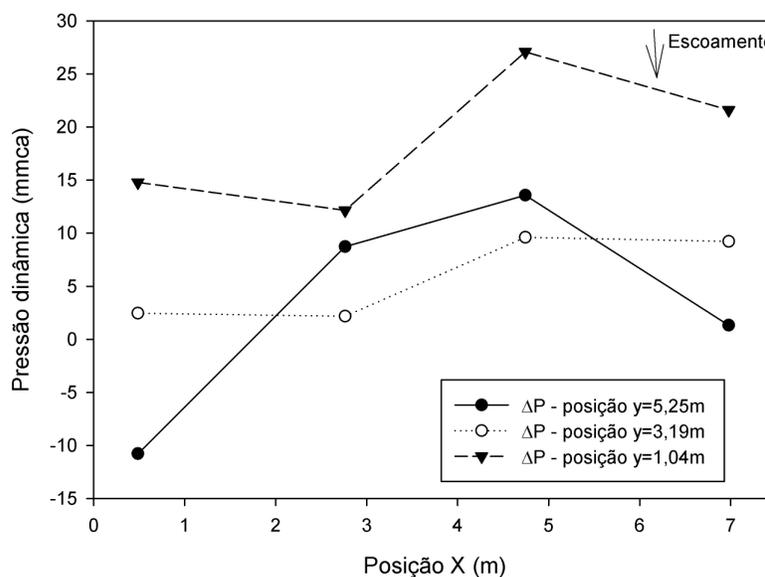


Figura 29 – Pressão dinâmica na caixa de ar no teste 2. A seta indica o sentido do escoamento em relação aos pontos de medição.

Pode-se verificar, na Figura 29 que, do mesmo modo do que no teste anterior, a pressão dinâmica (e a velocidade) não é uniforme nos planos horizontais e que as maiores diferenças, em cada plano horizontal, ocorreu entre as linhas de queimadores 2-5-8 e 3-6-9, evidenciando o escoamento ascendente com maior velocidade pelo lado leste (esquerdo) da caixa de ar que pelo lado oeste (direito).

Foi observado também que no ponto 1, no canto superior do lado oeste da caixa de ar, a diferença de pressão medida foi negativa. Esta situação não tem respaldo físico, mas repetiu-se em diversos testes subseqüentes realizados em condições operacionais diferentes, tanto no ponto 1 como em outros pontos do plano horizontal mais próximo do topo do trecho vertical da caixa de ar, em que é esperada a ocorrência de baixas velocidades e recirculação do escoamento.

A pressão estática, no duto de ar primário e secundário dos queimadores, comporta-se como mostrado na Figura 30.

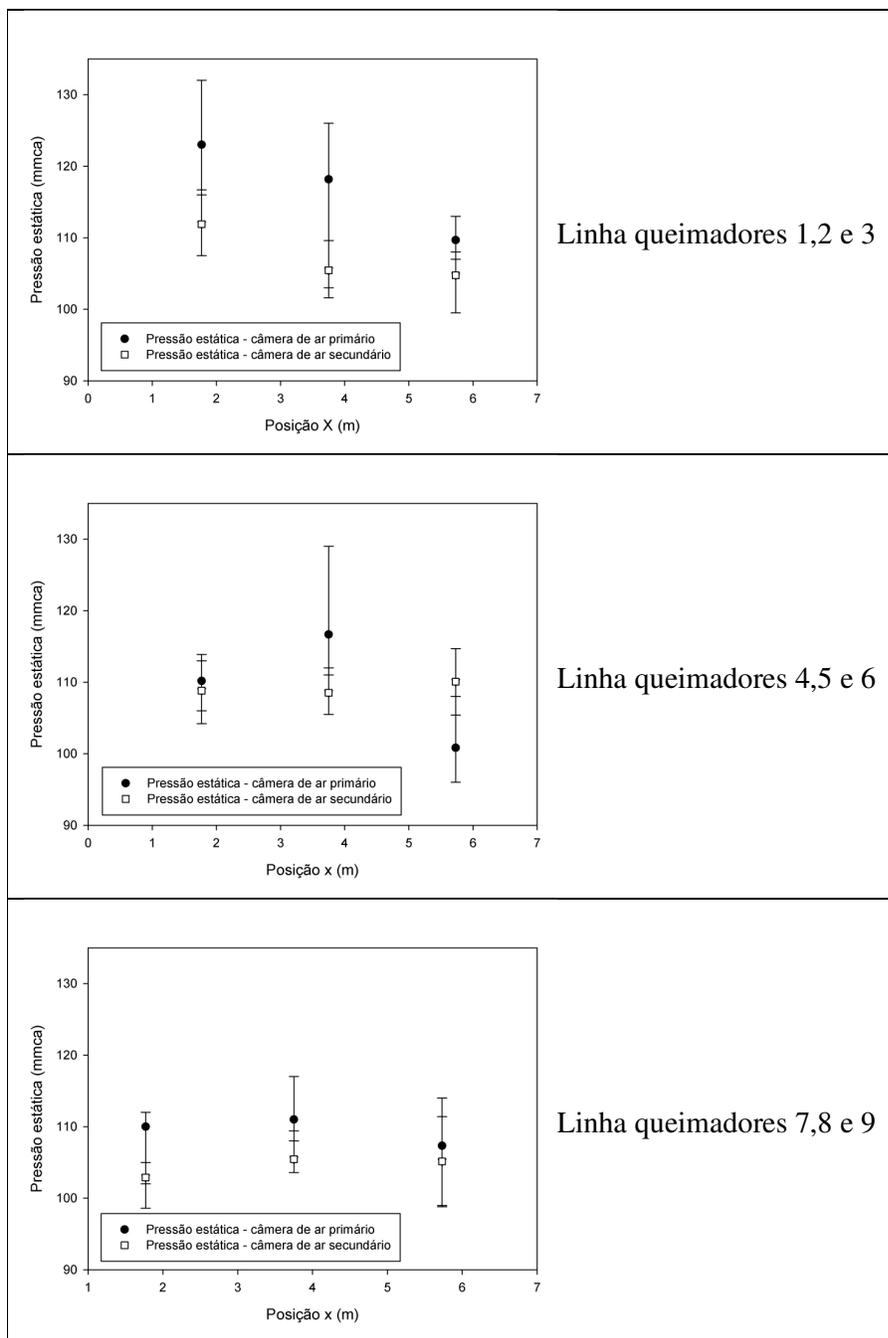


Figura 30 - Pressão estática nas câmaras de ar primário e secundário dos queimadores, no teste 2.

Nota-se que a pressão estática é maior nas câmaras de ar primário do que no ar secundário o que é explicado pela perda de carga devido ao *swirl* nesta câmara. Ao longo dos planos horizontais dos queimadores, as pressões estáticas são menores nas linhas de queimadores inferiores aumentando na direção dos queimadores superiores, como esperado fisicamente. Ou seja, ao longo do trecho ascendente do fluxo de ar as velocidades médias

diminuem e as pressões estáticas aumentam, o que está de acordo com o princípio de Bernoulli.

A Figura 31 mostra a variação da pressão de estagnação do escoamento no trecho horizontal da caixa de ar, a jusante do trocador regenerativo.

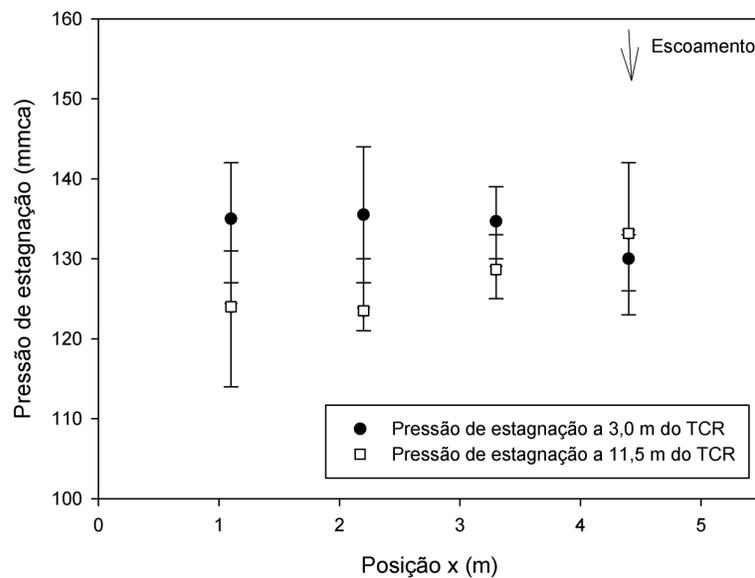


Figura 31 - Pressão de estagnação no duto horizontal, a jusante do trocador de calor tipo regenerativo (TCR), teste 2. A seta indica o sentido do escoamento em relação aos pontos de medição.

Observa-se na Figura 9 que a pressão de estagnação no trecho horizontal, mantém-se com simetria em relação ao plano central do duto, como era esperado.

A medição da temperatura das aletas de parede d'água, da mesma forma que no teste 1, não resultou em diferenças significativas nos oito pontos, conforme é apresentado na Figura 32.

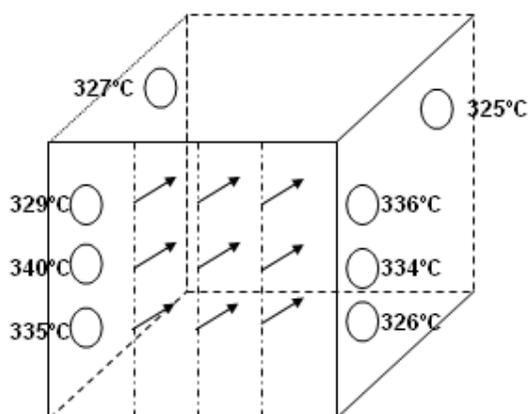


Figura 32 - Temperatura nas paredes laterais da caldeira, no teste 2. A parede leste situa-se à esquerda, a oeste à direita.

O teste 3 foi realizado com a mesma condição de processo do teste 2, tendo-se alterado apenas o combustível utilizado nos queimadores 2 e 5 de óleo 2 para óleo 1, conforme mostrado esquematicamente na Figura 33. Entre os testes 2 e o teste 3 os queimadores foram submetidos a limpeza.

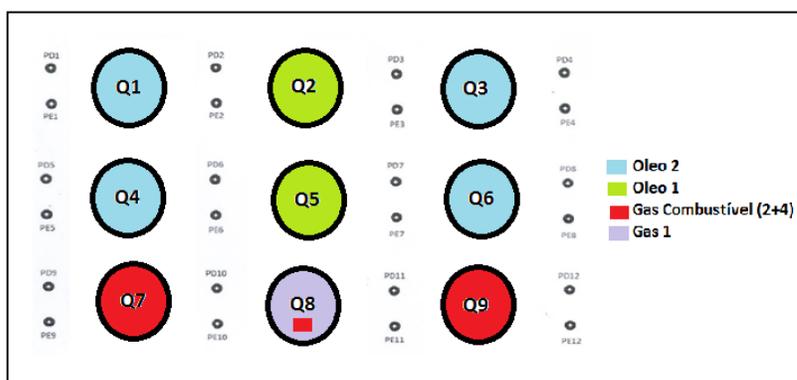


Figura 33 – Configuração dos queimadores no teste 3.

Neste teste foram feitas sete leituras em cada um dos pontos de medição. A diferença de pressão medida no trecho vertical da caixa de ar no teste 3 é apresentada na Figura 34.

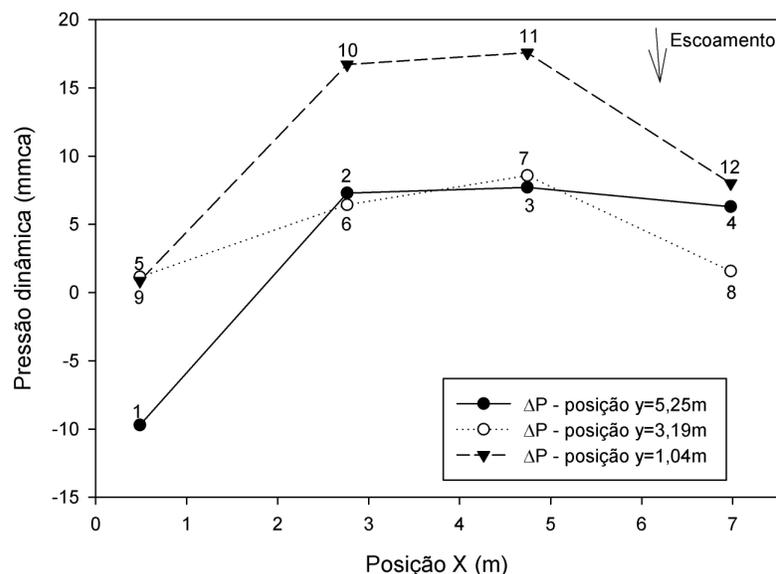


Figura 34 – Pressão dinâmica na caixa de ar no teste 3. A seta indica o sentido do escoamento em relação aos pontos de medição.

Verifica-se que a distribuição de velocidade se aproxima da condição de simetria em relação ao plano vertical central (que contém os eixos dos queimadores 2, 5 e 8), como esperado.

Os valores aproximadamente nulos da pressão dinâmica obtidos nos pontos 4, 5, 9 e 12 e negativos nos pontos 1 e 8 evidenciam a dificuldade de se apurar corretamente a direção da velocidade nos corredores verticais laterais da caixa de ar. Esta dificuldade coloca sob suspeita a confiabilidade da medição da pressão dinâmica, e indica que o estudo pode ser aprimorado efetuando-se a medição das pressões estática e de estagnação separadamente, em lugar de se medir diretamente a diferença entre elas, permitindo a observação do comportamento da pressão estática como parâmetro de avaliação do escoamento.

Os resultados obtidos nas medições de pressão estática no ar primário e secundário dos queimadores, pressão de estagnação da região horizontal de saída do regenerativo e temperaturas das aletas externas das paredes foram muito semelhantes aos obtidos nos testes anteriores.

No teste 4 foi mantida a mesma configuração de queimadores do teste 3, com todos os queimadores operando com a mesma distribuição de combustíveis. A mudança foi em relação a carga da caldeira que foi mantida em torno de 200 ton/h, o que corresponde a 71,4 % da

carga máxima da caldeira em operação contínua (carga nominal). Nesta condição, foi possível verificar maiores valores de pressão dinâmica, permitindo uma melhor avaliação do comportamento da velocidade no trecho vertical da caixa de ar, como é mostrado na Figura 35.

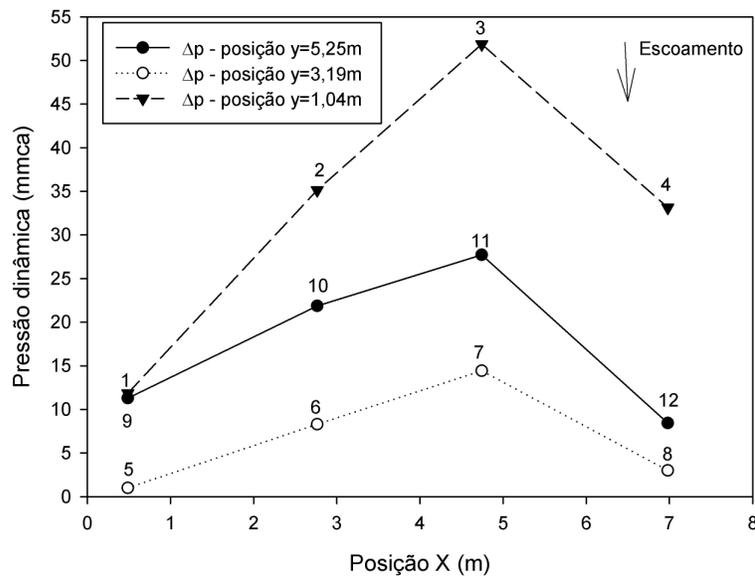


Figura 35 – Pressão dinâmica na caixa de ar no teste 4. A seta indica o sentido do escoamento em relação aos pontos de medição.

Na Figura 35, pode-se verificar, que, do mesmo modo do que nos testes anteriores, a diferença de pressão não é uniforme nos planos horizontais e que as maiores diferenças, em cada plano horizontal, ocorreu entre as linhas de queimadores 2-5-8 e 3-6-9, evidenciando o escoamento ascendente com maior velocidade pelo lado direito da caixa de ar que pelo lado esquerdo.

Foi observado também que em todos os pontos de medição do plano intermediário horizontal (5, 6, 7 e 8) os valores de pressão dinâmica são menores do que nos pontos correspondentes no plano superior (1, 2, 3 e 4), diferentemente dos resultados obtidos nos testes anteriores. No ponto 5, no canto intermediário esquerdo da caixa de ar, a diferença de pressão medida foi muito baixa. Novamente percebe-se que existe um corredor preferencial entre as colunas de queimador 2-5-8 e 3-6-9.

Nesta seção foram apresentados e discutidos os resultados dos testes realizados com a caldeira em operação.

Em resumo, verificou-se que a velocidade do ar na alimentação dos queimadores é influenciada pela configuração de queimadores (acesos ou apagados), pela configuração de combustíveis e pela vazão total, que é ditada pela carga da caldeira. Em relação à pressão de estagnação, não houve diferenças significativas ao longo do duto horizontal da caldeira. A pressão estática nas câmaras de ar primário e secundário, em todos os testes aumenta no sentido ascendente do escoamento na caixa vertical, conforme esperado.

Esta parte do estudo procurou averiguar também a ocorrência de aquecimento desigual das paredes laterais da caldeira devido a uma possível incidência de chama. Contudo, análise da temperatura das paredes, durante os testes com a caldeira operando não confirmou a suspeita de aquecimento não uniforme. Por conta disto, e considerando que a avaliação da influência de todos os parâmetros indicados anteriormente não seria viável no prazo estabelecido para esta pesquisa, optou-se por continuar o trabalho com a caldeira desligada (sem geração de vapor).

#### **4.3 Análise dos experimentos com a caldeira apagada**

Nesta etapa a caldeira foi apagada e os testes foram realizados na condição de queimadores apagados, ou seja, sem geração de vapor, mantendo-se a caldeira em regime de hibernação, isto é, com apenas alguns sistemas em operação, em particular o sistema de pré-aquecimento do ar de combustão (possibilitando manter-se uma temperatura do ar constante) e o ventilador de ar de combustão (de modo a obter-se vazões de ar controladas através do registro de sucção do ventilador).

Nesta etapa, com o objetivo de se fazer uma comparação com os resultados obtidos durante a etapa de caldeira acesa, os registros de ar primário e secundário foram mantidos ou na condição abertos ou na condição fechados, simulando respectivamente o queimador aceso ou apagado. Primeiramente, foram feitos 3 testes, um para cada coluna. E, num segundo momento foram realizados testes nas mesmas condições de queimadores dos testes “a quente”.

O primeiro teste de coluna, caldeira apagada, teste 8, foi realizado mantendo-se a primeira coluna de queimadores (1, 4 e 8) com os registros totalmente abertos e os demais fechados, conforme mostrado na Figura 36.

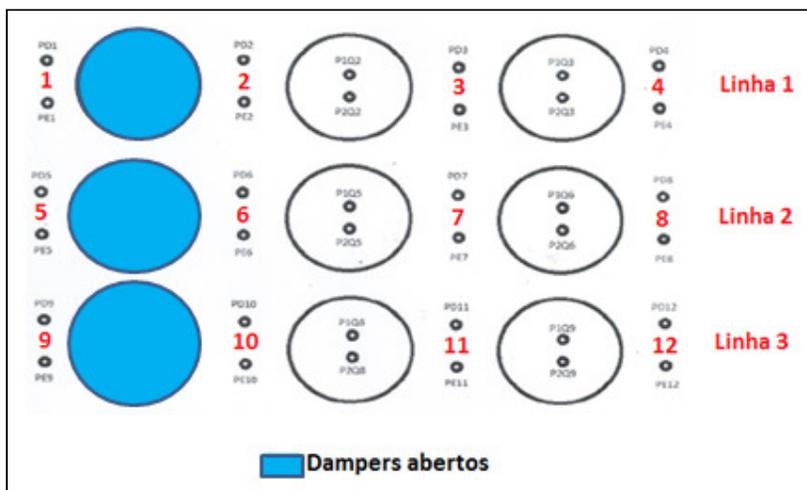


Figura 36 - Queimadores com registros abertos do teste 8.

No teste 8, a temperatura de ar e pressão na caixa de ar foram mantidas nas condições apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Variáveis de processo mantidas fixas durante o teste 8.

Abertura do registro do ventilador (%)	Temperatura de ar (°C)	Pressão de ar (mmca)
35	144,03	143,08

Os resultados do teste 8 são apresentados na Figura 37.

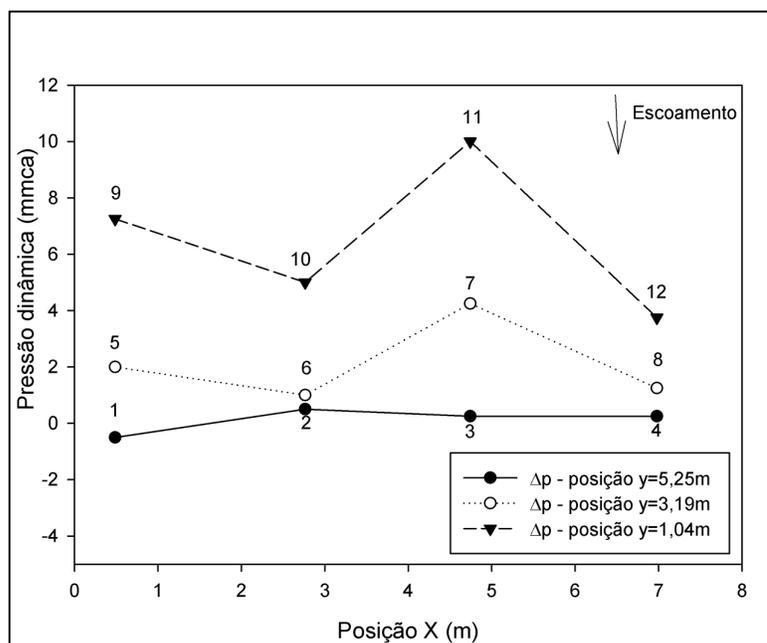


Figura 37 – Pressão dinâmica na caixa de ar no teste 8. A seta indica o sentido do escoamento em relação aos pontos de medição.

De forma semelhante ao que se verificou nos testes “a quente”, a distribuição de velocidade no trecho vertical da caixa de ar não é uniforme ao longo dos planos horizontais. A componente vertical da velocidade é mais alta na altura da linha dos queimadores Q7, Q8 e Q9 e tende a zero na linha dos queimadores Q1, Q2 e Q3.

Os resultados também apontam a diminuição de vazão na direção vertical nos lados da coluna de queimadores abertos (Q1, Q4 e Q7), sugerindo que o ar que atinge os queimadores Q4 e Q1, na configuração do teste 8, escoava predominantemente no plano horizontal, enquanto o queimador Q7 é atingido pela corrente ascendente que atinge a linha inferior de queimadores pelo lado leste (esquerdo) da caixa de ar.

As medidas de pressão estática nos dutos de ar primário e secundário dos queimadores e de pressão de estagnação no trecho horizontal da caixa de ar não apresentaram diferença considerável em comparação com os resultados dos testes anteriores conforme apresentado nos Apêndices A e B respectivamente, pelo que não serão mais comentados.

O segundo teste de coluna, teste 9, foi executado nas mesmas condições operacionais do teste 8. Foram abertos os registros dos queimadores 2,5 e 8, conforme mostrado na Figura 38.

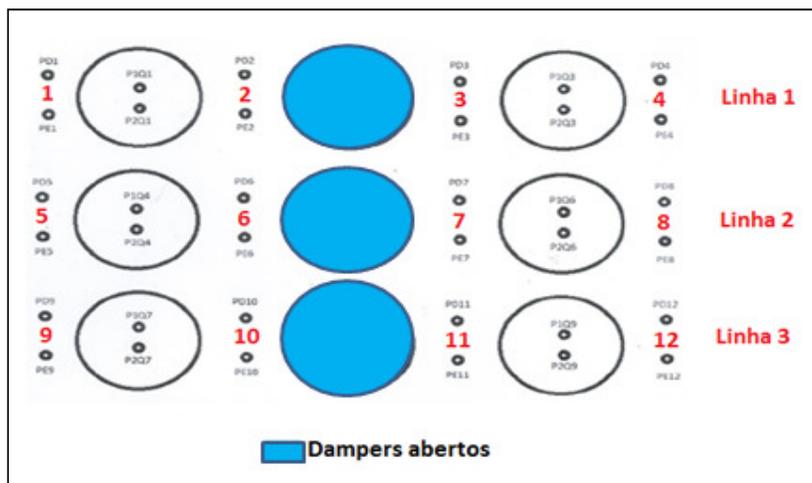


Figura 38 - Queimadores com registros abertos do teste 9.

A Figura 39 apresenta a distribuição da pressão dinâmica no trecho vertical no teste 9.

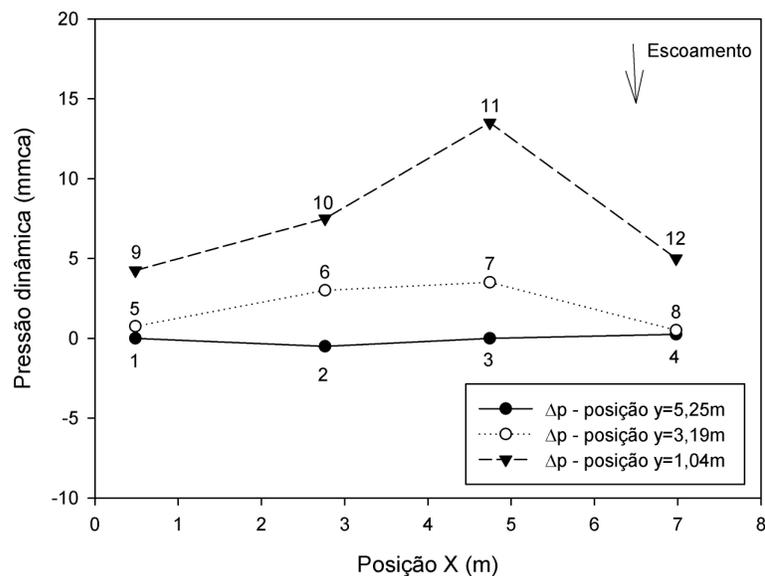


Figura 39 - Pressão dinâmica na caixa de ar no teste 9. A seta indica o sentido do escoamento em relação aos pontos de medição.

Pode-se verificar que, apesar da configuração dos queimadores abertos ser simétrica em relação ao plano médio vertical da caixa de ar, a simetria da distribuição de velocidades ocorre apenas na metade superior da caixa de ar. Incluindo o plano dos queimadores Q4, Q5 e Q6 e o plano dos queimadores Q1, Q2 e Q3, evidenciando a existência de um caminho preferencial para o escoamento do ar no trecho vertical da caixa entre a coluna de queimadores central e a da direita (parede oeste).

Mesmo na última linha de queimadores (Q7, Q8 e Q9), verifica-se que a componente vertical da velocidade nas laterais da caixa de ar é pequena, indicando o direcionamento do escoamento para a região central.

O terceiro teste de coluna, teste 10, foi executado nas mesmas condições operacionais dos testes anteriores (8 e 9), tendo-se mantido abertos os registros dos queimadores Q3, Q6 e Q9, conforme mostrado na Figura 40.

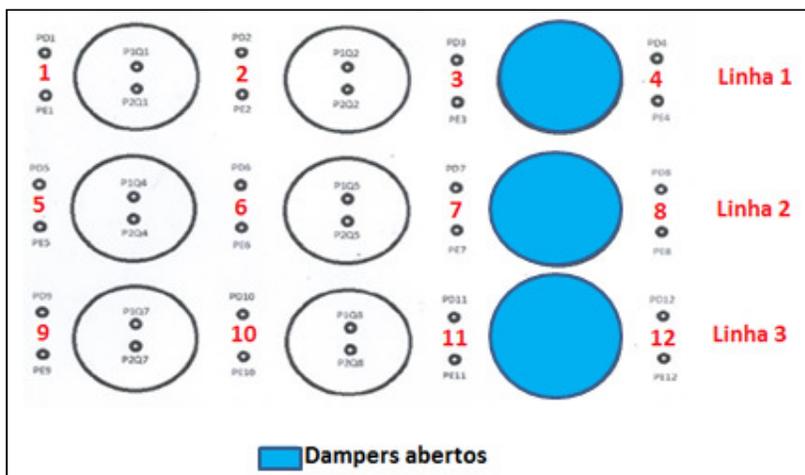


Figura 40 - Queimadores com registros abertos do teste 10.

Os resultados da medição das diferenças de pressão no trecho vertical da caixa de ar no teste 10 são apresentados na Figura 41.

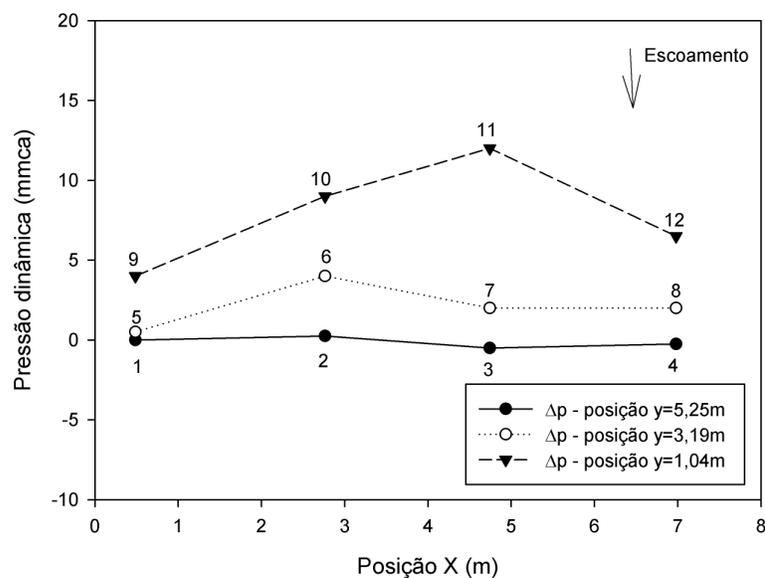


Figura 41 – Pressão dinâmica na caixa de ar no teste 10. A seta indica o sentido do escoamento em relação aos pontos de medição.

No teste 10 esperava-se obter um resultado que, graficamente, seria uma imagem especular do resultado do teste 8, apresentado na Figura 12.

Qualitativamente, este comportamento é apresentado nas colunas de pontos de medição 1-5-9 e 4-8-12, além dos pares 2-6 e 3-7.

Entretanto, a velocidade no ponto 11, teste 9, é um pouco maior que no teste 8, e indica, como nos testes anteriores, a existência de uma região de entrada preferencial do escoamento de ar no trecho vertical do duto.

Na seqüência do trabalho foram realizados 5 testes com a caldeira apagada repetindo as condições de processo (temperatura de ar e pressão total na caixa de ar) e a configuração de queimadores (acesos/abertos ou apagados/fechados) dos testes realizados com a caldeira acesa. A finalidade da realização destes testes foi poder comparar a condição de caldeira acesa com a condição apagada para os efeitos de escoamento nas regiões a montante da fornalha. A comparação dos resultados de pressão dinâmica obtidas nos testes “a quente” e “a frio” é apresentada no Apêndice C.

Os resultados obtidos com a caldeira operando sem geração de vapor não apresentaram discrepância qualitativa e nem quantitativa relevante em comparação aos testes realizados com caldeira acesa.

Verificou-se, assim, que os testes realizados com a caldeira apagada são representativos do comportamento da caldeira operando “a quente”, e conclui-se não ser necessário o acendimento da caldeira para a continuação do estudo.

#### **4.4 Resultados da simulação por planejamento fatorial**

A partir dos resultados de pressão dinâmica obtidos durante os experimentos realizados com a caldeira acesa e apagada, foi possível analisar as respostas, sob o ponto de vista estatístico, através da geração de equações de regressão ou modelos correlacionando as variações das variáveis controladas com as pressões dinâmicas obtidas. Sabendo-se das diferenças de velocidades pontuais encontradas nas regiões de suprimento de ar (caixa de ar) durante a realização dos testes de caldeira acesa e apagada, aplicou-se a metodologia fatorial para definir as condições operacionais dos testes, como explicado na seção 3.5.

O experimento simulou o regime operacional da caldeira com todos os queimadores operando, variando-se a abertura dos registros de ar primário e de ar secundário conforme as combinações previstas. Foram realizadas duas réplicas para cada experimento com 7 coletas para cada combinação. Adicionalmente, foram realizados 2 ensaios no ponto central, com o objetivo de estimar o erro experimental e testar a linearidade do modelo. A análise estatística dos dados obtidos foi realizada utilizando-se o programa MINITAB versão 16.

No experimento foram analisados inicialmente quais os fatores mais críticos e a linearidade entre os fatores.

Verificou-se que os fatores têm baixa interação nos pontos de medição 1 a 4, situados no plano superior de queimadores (Q1 e Q3).

Nos outros dois planos, em que a componente da velocidade na direção vertical é maior, verificou-se a interação entre os fatores, como mostra na Figura 42, que apresenta a interação entre os fatores registro de ar primário e registro de ar secundário, para o ponto 8 (situado entre os queimadores Q4 e Q5).

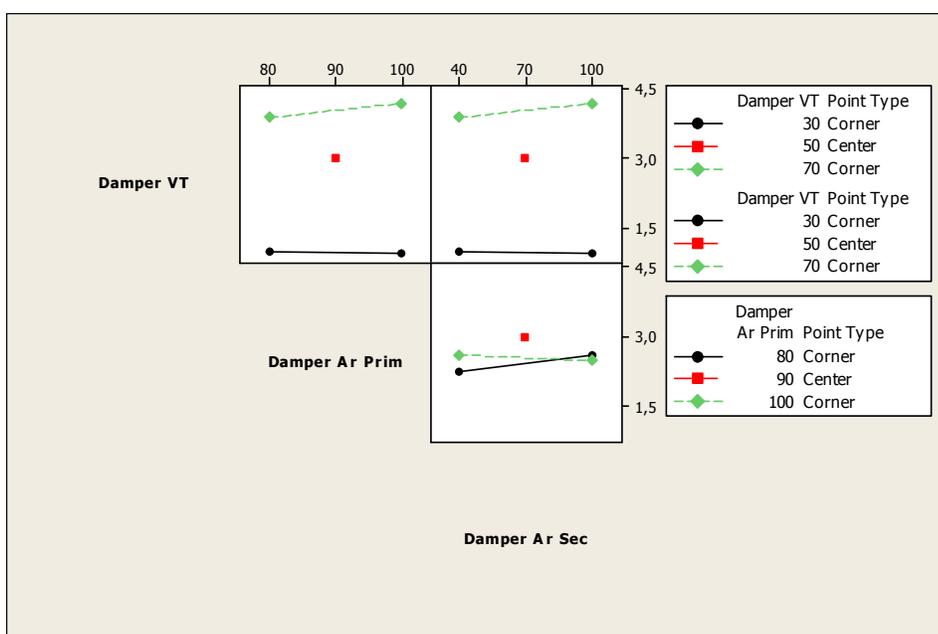


Figura 42 – Mapa da interação entre fatores, para o ponto 8. Os valores nos eixos dos gráficos referem-se à abertura percentual dos registros controlados.

Em relação aos efeitos principais sobre a variável de resposta (pressão dinâmica), percebe-se que todos os parâmetros têm influência direta. Porém os registros de ar primário e secundário dos queimadores têm efeito muito baixo. A abertura do registro do ventilador é o fator que mais influencia a resposta, conforme pode-se verificar no gráfico de efeito principal para o ponto 8, na Figura 43.

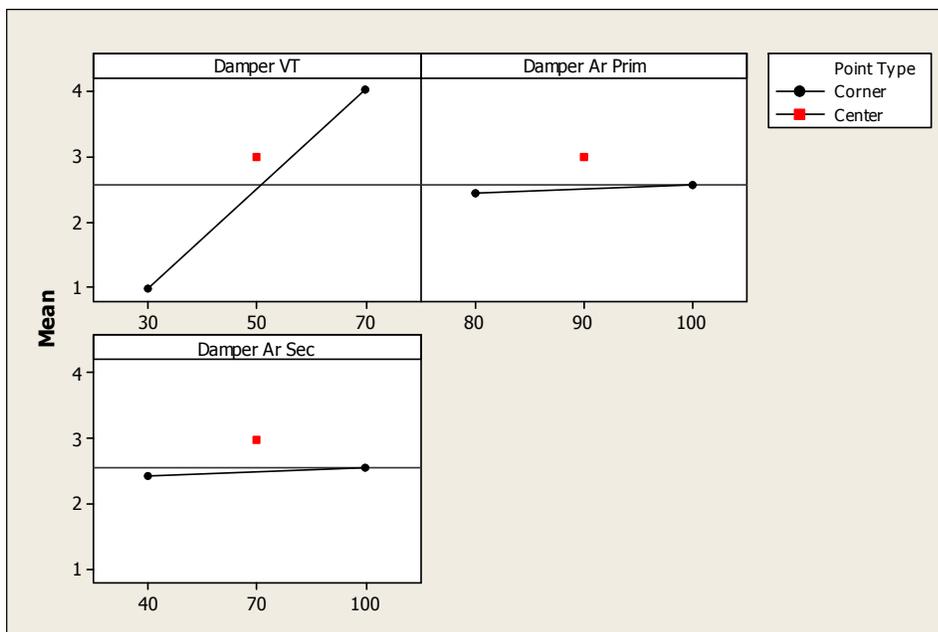


Figura 43 – Mapa de efeito principal para o ponto 8. Os valores nos eixos dos gráficos referem-se à abertura percentual dos registros controlados.

Os pontos vermelhos na Figura 43 representam os pontos centrais. Em alguns casos verificou-se o efeito negativo sobre a resposta, estes casos foram percebidos nos pontos da linha superior, próximos aos queimadores 1, 2 e 3.

A partir dos resultados obtidos através das combinações do modelo fatorial, foi possível analisar o comportamento das respostas encontradas, do ponto de vista estatístico, através da geração de equações de regressão, ou modelos, correlacionando a diferença de pressão com o grau de abertura dos registros.

Analisando os dados apresentados da ANOVA de todos os pontos da caixa de ar, verifica-se que com o nível de significância de 5% nem todos os efeitos principais são significativos sobre a pressão dinâmica. Em relação às interações de 2ª e 3ª ordem, nenhuma interação obteve a significância. A análise de variância (ANOVA) dos pontos de 1 a 12 é apresentada no Apêndice D.

Os efeitos de não-linearidade na relação entre os parâmetros e a variável de resposta não são significativos, e a aplicação do modelo linear empregado neste projeto de experimento mostra-se assim adequado.

Na Tabela 13 são apresentados os modelos matemáticos de cada um dos 12 pontos de medição da caixa de ar. Em cada modelo foram desprezados os termos de menor contribuição ( $p < 0,05$ ).

Tabela 13 - Modelos  $\Delta P=f(X1, X2, X3)$  obtidos por regressão para os pontos de medição.

Ponto ( $Y_i$ )	Modelo	$R^2$	Raiz quadrada média do erro
$\Delta P_1$	0,080.X1	48,89%	0,0798
$\Delta P_2$	0,233.X1	55,03%	0,2256
$\Delta P_3$	0,028.X1	46,19%	0,1006
$\Delta P_4$	0,125.X1	38,89%	0,0763
$\Delta P_5$	-1,698+0055.X1+0,024.X3	98,56%	0,0938
$\Delta P_6$	-1,27+0,189.X1	89,62%	0,8056
$\Delta P_7$	-10,75+0,458.X1 +0,078.X3	99,02%	0,6110
$\Delta P_8$	2,917-0,075.X1	81,47%	0,9792
$\Delta P_9$	5,52+0,060.X1	99,55%	0,55
$\Delta P_{10}$	-9,948+0,540.X1	97,8%	5,61
$\Delta P_{11}$	-6,198+0,621.X1	99,86%	0,88
$\Delta P_{12}$	-3,531+0,288.X1	99,81%	0,142

Alguns pontos apresentaram termo significante somente para variável X1 (registro do VT), pontos da linha 1. Já os demais apresentaram significância para a constante e/ou registro do VT e registro de ar secundário. Não se observa um efeito principal significativo a um nível de 100% de probabilidade em nenhum caso.

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) tem valores baixos nos pontos 1 a 4 (linha 1). Entretanto, para os pontos das linhas 2 e 3, o valor obtido para  $R^2$  permite explicar a variação total em torno da média, sendo a diferença explicada pelos resíduos. Contudo, os baixos valores de  $R^2$  obtidos limitam a aplicação dos modelos regredidos para os pontos 1 a 4 como ferramenta de análise.

A variável X2 (registro do primário) não afeta significativamente para o teste  $p$  (95 % de significância) em nenhum dos pontos de medição, ou seja, este fator não tem influência significativa nas pressões dinâmicas (velocidades) obtidas.

De modo a garantir a validade da análise estatística do experimento, é necessário que se confirmem alguns pressupostos. Conforme Werkema e Aguiar, 1996, deve-se confirmar a suposição inicial de que o erro experimental (incerteza de medição e erros de ajuste) está

distribuído de forma randômica entre todos os ensaios realizados. Neste caso, o resíduo deve apresentar distribuição normal com média zero e variância constante.

Na verificação dos histogramas de todos os pontos, verificou-se que a distribuição dos resíduos (diferença entre a pressão dinâmica calculada pelo modelo e as medições) se aproxima de uma distribuição normal e com média zero e variância relativamente constante. Tal fato pode ser confirmado nas curvas de distribuição normal dos resíduos das Figuras 44 a 55, nas quais pode-se observar que os resíduos mantêm-se próximos à reta que representa a normalidade da distribuição. Nas figuras 44 a 55, o resíduo no ponto “PX” é designado por “Delta PX”.

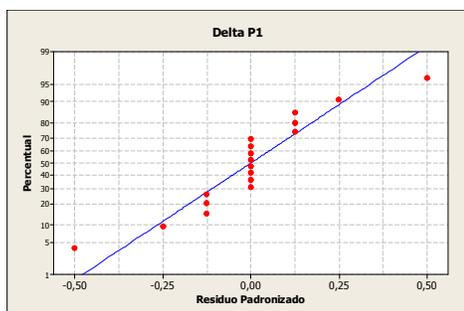


Figura 44 - Distribuição de probabilidade normal dos resíduos no ponto 1.

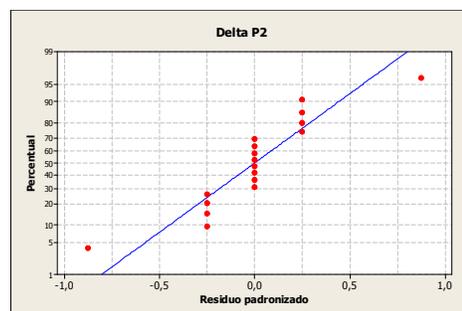


Figura 45 - Distribuição de probabilidade normal dos resíduos no ponto 2.

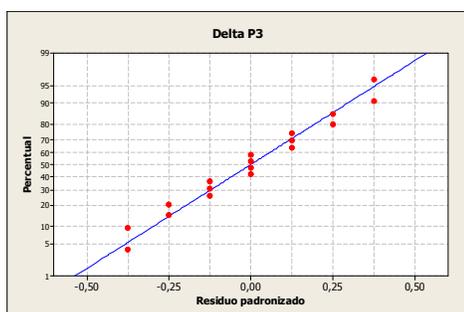


Figura 46 - Distribuição de probabilidade normal dos resíduos no ponto 3.

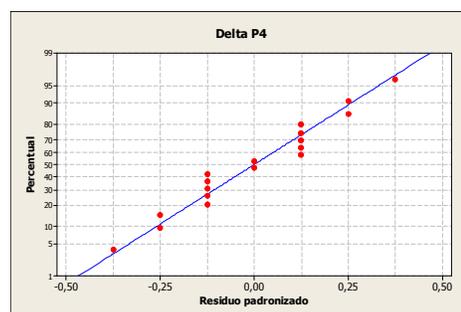


Figura 47 - Distribuição de probabilidade normal dos resíduos no ponto 4.

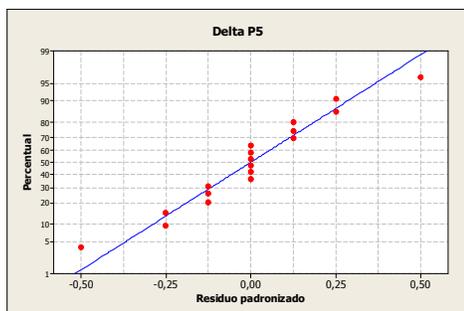


Figura 48 - Distribuição de probabilidade normal dos resíduos no ponto 5.

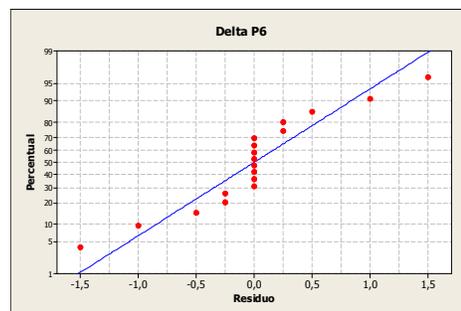


Figura 49 - Distribuição de probabilidade normal dos resíduos no ponto 6.

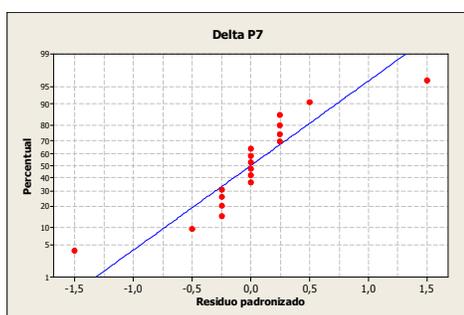


Figura 50 - Distribuição de probabilidade normal dos resíduos no ponto 7.

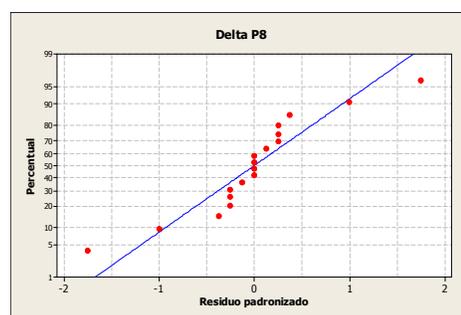


Figura 51 - Distribuição de probabilidade normal dos resíduos no ponto 8.

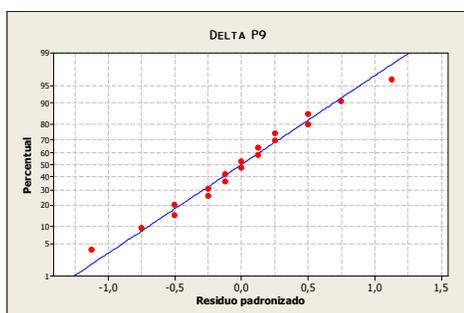


Figura 52 - Distribuição de probabilidade normal dos resíduos no ponto 9.

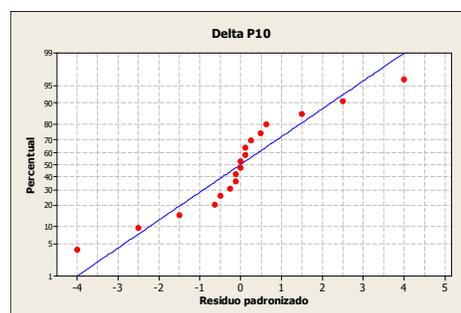


Figura 53 - Distribuição de probabilidade normal dos resíduos no ponto 10.

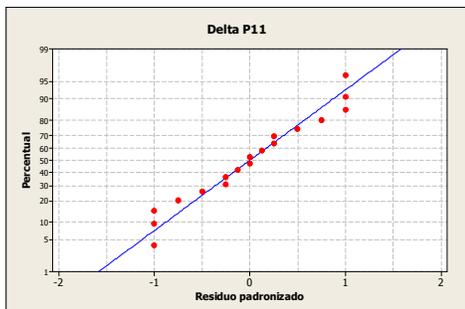


Figura 54 - Distribuição de probabilidade normal dos resíduos no ponto11.

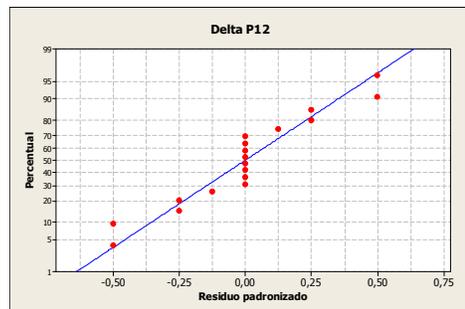


Figura 55 - Distribuição de probabilidade normal dos resíduos no ponto 12.

As Figuras 58 a 67 apresentam os resíduos padronizados por ordem para cada ponto de medição. Verifica-se que não há qualquer tipo de relação entre a ordem da execução dos ensaios que representa violação às condição de aleatoriedade e à independência na distribuição dos erros.

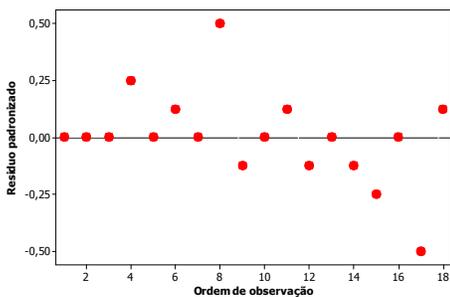


Figura 56 - Resíduos padronizados por ordem de observação do Ponto 1.

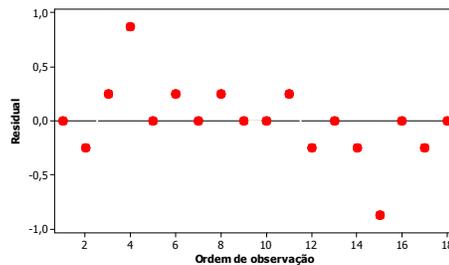


Figura 57 - Resíduos padronizados por ordem de observação do Ponto 2.

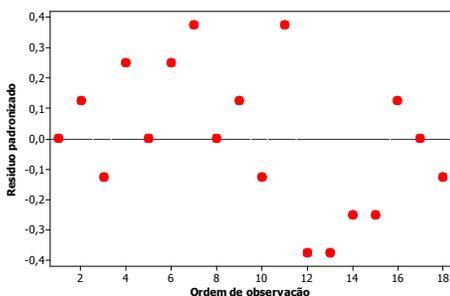


Figura 58 - Resíduos padronizados por ordem de observação do Ponto 3.

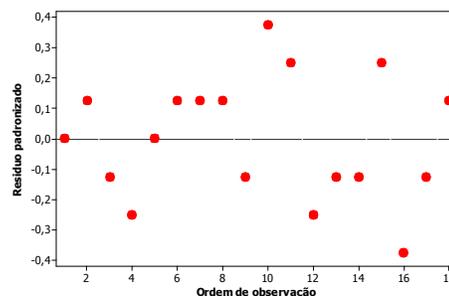


Figura 59 - Resíduos padronizados por ordem de observação do Ponto 4.

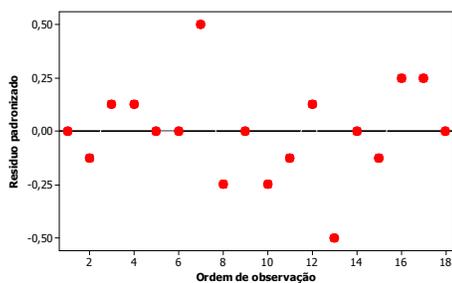


Figura 60 - Resíduos padronizados por ordem de observação do Ponto 5.

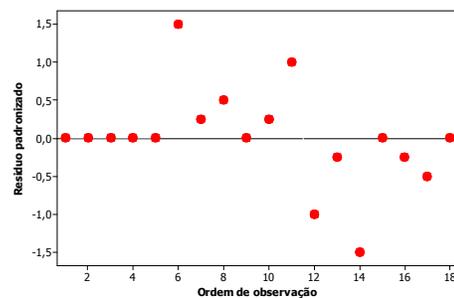


Figura 61 - Resíduos padronizados por ordem de observação do Ponto 6.

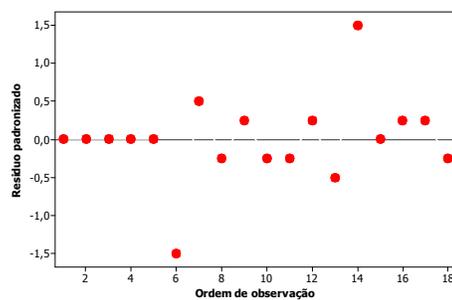


Figura 62 - Resíduos padronizados por ordem de observação do Ponto 7.

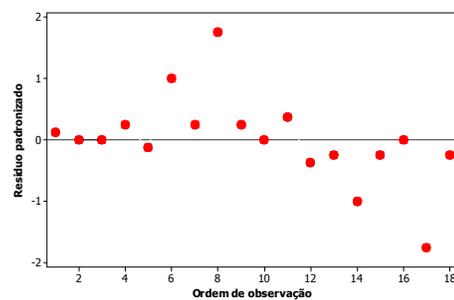


Figura 63 - Resíduos padronizados por ordem de observação do Ponto 8.

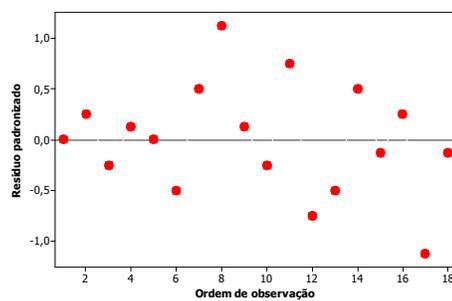


Figura 64 - Resíduos padronizados por ordem de observação do Ponto 9.

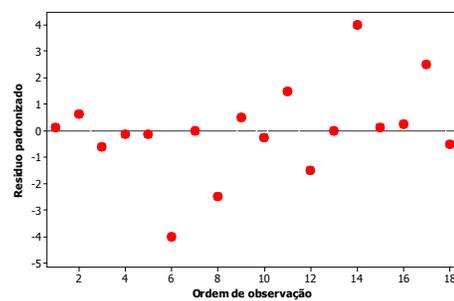


Figura 65 - Resíduos padronizados por ordem de observação do Ponto 10.

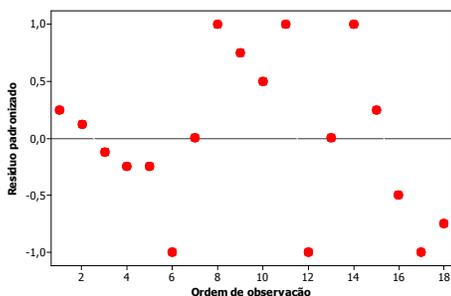


Figura 66 - Resíduos padronizados por ordem de observação do Ponto 11.

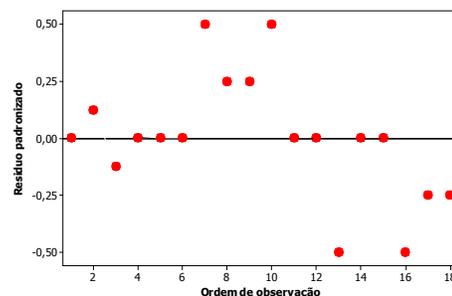


Figura 67 - Resíduos padronizados por ordem de observação do Ponto 12.

Com o objetivo de verificar a resposta dos modelos matemáticos obtidos na análise estatística dos experimentos, foi configurado um teste com os valores das variáveis controláveis, teste 51, conforme mostrado na Tabela 14.

Tabela 14 – Condições dos fatores no teste realizado para verificação da validade dos modelos.

Fator	Nível
X1= registro do ventilador (%)	60
X2= registro do ar primário (%)	100
X3= registro do ar secundário (%)	60

Este experimento foi realizado com os registros dos 9 queimadores na mesma configuração. Manteve-se a variável X2 (registro de ar primário) em 100% por se ter verificado anteriormente que este parâmetro não afeta o teste  $p$ , com 95% de significância. Além disso, a abertura total desse registro é uma condição operacional usual recomendada pelo fabricante da caldeira.

A Figura 68 apresenta a comparação das pressões dinâmicas medidas e as calculadas. Verifica-se que os modelos reproduziram a distribuição de velocidades com boa concordância.

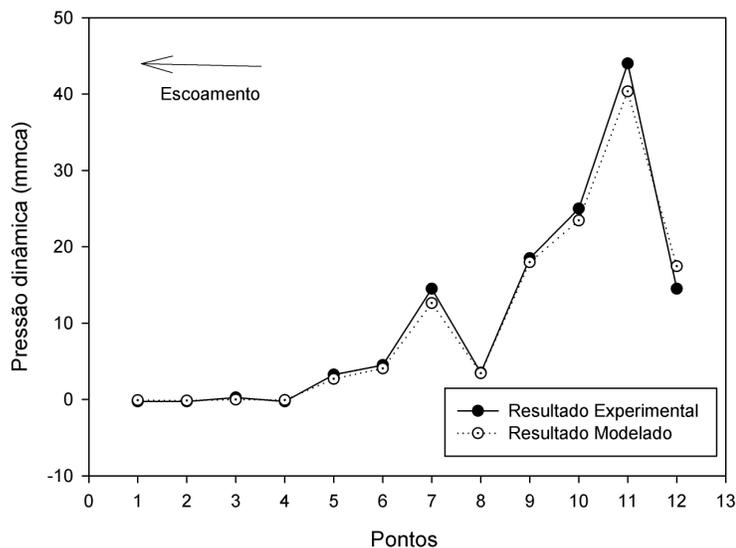


Figura 68 – Comparação das pressões dinâmicas entre o experimental (teste 51) e o calculado em todos os pontos, na primeira verificação dos modelos.

O maior erro relativo verificado na primeira verificação dos modelos foi de 14% verificado no ponto 11, como pode ser verificado na Tabela 15.

Tabela 15 – Erros relativo da primeira verificação dos modelos

Pontos	Erro relativo (%)
1	-
2	-
3	-
4	-
5	6,2
6	6,6
7	13,0
8	2,0
9	2,9
10	6,2
11	14,5
12	2,0

Nos pontos negativos ou nulos (pontos de 1 a 4) não há medição correta para analisar o erro relativo entre os modelos e as mostras.

Como segunda verificação dos modelos, fez-se a comparação das pressões dinâmicas calculadas com os resultados do testes 11 feito com a caldeira sem a geração de vapor

(desligada) e cujas condições dos parâmetros são mostradas na Tabela 16. No teste 11, os queimadores Q4 e Q6 foram mantidos fechados. Não é possível introduzir esta informação nos modelos.

Tabela 16 – Condição adotada nos queimadores do segundo teste de verificação dos modelos.

Fator	Nível
X1= registro do ventilador (%)	38
X2= registro do ar primário (%)	100
X3= registro do ar secundário (%)	100

A Figura 69 apresenta o resultado da comparação.

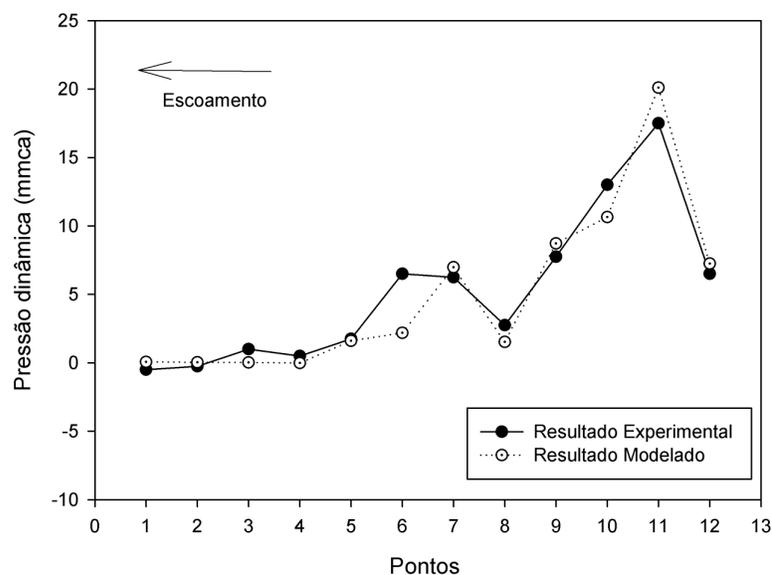


Figura 69 – Comparação das pressões dinâmicas entre o experimental (teste 11) e o calculado em todos os pontos, na segunda verificação dos modelos.

Verifica-se uma maior discrepância entre os valores medidos e os calculados que no primeiro teste de verificação dos modelos, principalmente nas linha 2 ( Q4, Q5 e Q6) e 3 ( Q7, Q8 e Q9). O maior erro relativo, de 66,4%, ocorre no ponto 6.

A diferença é mais acentuada no ponto 6, que se situa entre os queimadores Q4 e Q5, pelo lado esquerdo do plano médio vertical da caixa de ar.

É interessante notar que os pontos 5 e 7, que estão na mesma linha e à esquerda dos queimadores Q4 e Q6 que, no experimento, foram mantidos fechados. Os modelos desses dois

pontos são únicos que possuem interação da abertura do registro de ar secundário com a abertura do registro do ventilador. Ainda assim, as pressões dinâmicas calculadas nestes pontos apresentam boa concordância com os valores experimentais. Isto reforça a indicação da vazão total de ar sendo o parâmetro de maior influência no processo.

Na terceira verificação dos modelos foi feita a comparação dos resultados experimentais do teste 12 com os modelos. No teste 12, feito com a caldeira apagada, os queimadores Q2, Q4 e Q6 foram mantidos fechados. A Figura 70 apresenta a comparação.

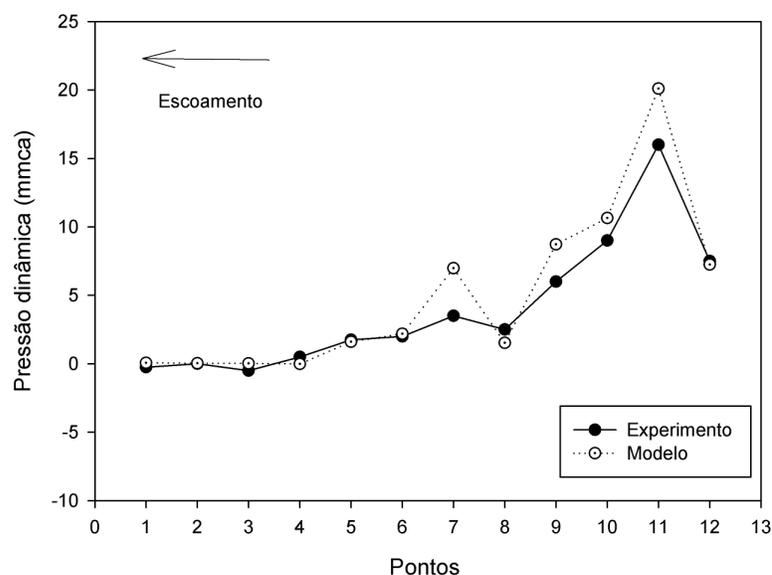


Figura 70 – Comparação das pressões dinâmicas entre o experimental (teste 12) e o calculado em todos os pontos, na terceira verificação dos modelos.

Observa-se que o resultado dos modelos apresenta discrepância em relação aos dados experimentais principalmente na região de maiores velocidades (linha 3, queimadores Q7, Q8 e Q9). O maior erro relativo, de 25,6%, ocorre no ponto 11.

Os modelos resultantes da análise fatorial reproduzem a ocorrência de um caminho preferencial, pelo lado direito do plano médio vertical da caixa de ar.

Dois testes de verificação dos modelos foram feitos comparando os resultados calculados com os dados experimentais de testes com todos os queimadores totalmente abertos.

A Figura 71 apresenta a comparação das pressões dinâmicas calculadas com os valores medidos no teste 13, conduzido com a caldeira apagada e com a abertura do registro do ventilador em 40%. O maior erro relativo, de 33,4%, ocorre no ponto 6.

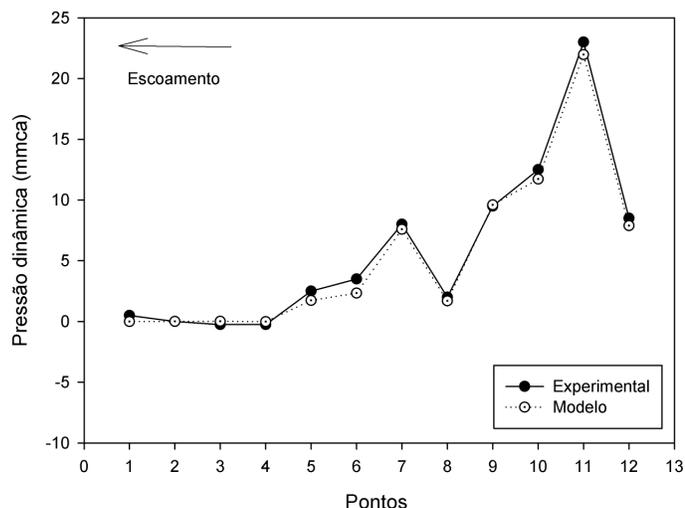


Figura 71 – Comparação das pressões dinâmicas entre o experimental (teste 13) e o calculado em todos os pontos, na quarta verificação dos modelos.

A Figura 72 mostra a comparação dos dados experimentais do teste 7 conduzido com a caldeira em operação, com todos os queimadores acesos, produzindo 147 ton/h de vapor, temperatura do ar em 241°C e vazão total de ar 39,48 m<sup>3</sup>/h (X1=35%), quinta verificação dos modelos. O maior erro relativo, de 27,7%, ocorre no ponto 8.

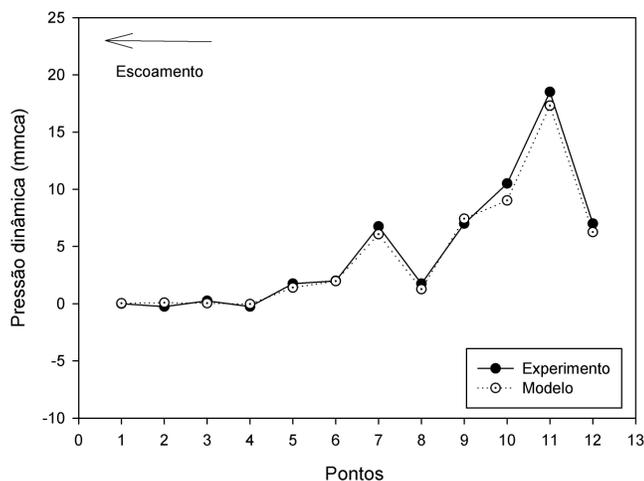


Figura 72 – Comparação das pressões dinâmicas entre o experimental (teste 7) e o calculado em todos os pontos, na quinta verificação dos modelos.

Verifica-se que os modelos reproduzem os resultados experimentais com boa concordância quando todos os queimadores estão abertos, tanto para a operação sem geração de vapor, como nos testes em que os modelos foram obtidos, como para a operação com queimadores acesos.

Neste capítulo foram apresentados e discutidos os resultados do estudo. Como conclusão, tem-se que os modelos obtidos a partir da análise fatorial podem ser utilizados para estimar o campo de velocidades na seção vertical da caixa de ar.

Os resultados experimentais indicam a existência de uma região em que o escoamento ascendente tem maior velocidade, pelo lado direito do plano médio vertical da caixa de ar.

Adicionalmente, verificou-se que a velocidade do escoamento diminui a jusante de cada linha de queimadores. Este resultado era esperado, uma vez que há passagem de parte do ar para o interior da câmara de combustão e a seção transversal da caixa de ar não diminui.

Na linha superior de queimadores (Q1, Q2 e Q3) prevalece à componente transversal de velocidade, tendo-se obtido valores muito baixos de velocidade para a componente na direção vertical.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A alimentação de ar aos queimadores de uma caldeira de queima frontal foi analisada experimentalmente. Para tanto foram realizadas medições de pressão estática e de estagnação em vários pontos, utilizando tubos de Pitot, de forma a caracterizar o campo de velocidade na caixa de ar, para várias condições de operação e configurações de abertura das entradas de ar dos queimadores.

Foram realizados testes com a caldeira operando “a quente” e “a frio”. As condições de operação dos testes com a caldeira apagada foram especificados aplicando-se a metodologia de planejamento fatorial.

Verificou-se que a velocidade do ar na alimentação dos queimadores é influenciada pela condição de queimador aceso ou apagado e também pelas configurações de combustíveis e pela vazão total, que é ditada pela carga da caldeira. Em relação à pressão de estagnação, ao longo do duto horizontal da caldeira, não houve diferenças consideráveis dos resultados de medição, sugerindo que não existe influência da rotação do regenerativo no comportamento do escoamento.

A comparação dos resultados experimentais obtidos com a caldeira apagada (sem geração de vapor) e com os dados dos experimentos realizados com caldeira acesa, mostra que não há discrepância qualitativa e nem quantitativa relevante, possibilitando estudar o comportamento do escoamento a frio.

A dificuldade de posicionamento das sondas Pitot devidamente alinhadas com a direção principal do escoamento coloca sob suspeita a confiabilidade da medição da pressão dinâmica. Isto indica que o estudo pode ser aprimorado efetuando-se a medição das pressões estática e de estagnação separadamente, em lugar de se medir diretamente a diferença entre elas, permitindo a observação do comportamento da pressão estática como parâmetro de avaliação do escoamento.

Utilizando-se os modelos obtidos por planejamento fatorial para cada ponto, observou-se que estes reproduzem os resultados experimentais com boa concordância quando todos os queimadores estão abertos, tanto para a operação com caldeira desligada, como nos testes em que os modelos foram obtidos, como a caldeira ligada. Estes testes revelaram que os modelos obtidos a partir da análise fatorial podem ser utilizados para estimar o campo de velocidades na seção vertical da caixa de ar. Os resultados experimentais indicaram a existência de uma

região em que o escoamento ascendente tem maior velocidade, pelo lado direito do plano médio vertical da caixa de ar.

As principais conclusões do trabalho são:

- A avaliação da influência da rotação do aquecedor de ar regenerativo sobre o comportamento do escoamento requer um estudo mais detalhado;
- O comportamento do escoamento na caixa de ar pode ser estudado operando-se a caldeira a frio, sem geração de vapor;
- A alimentação de ar aos queimadores não é uniforme nas colunas, nas condições de operação avaliadas;
- A pressão estática nas câmaras de ar primário e secundário não responde a variações de vazão total nas condições de operação avaliadas;
- O escoamento apresenta assimetria na distribuição de velocidade ao longo do trecho vertical da caixa de ar, independentemente da simetria da configuração de queimadores abertos e fechados;
- Modelos obtidos a partir da aplicação da metodologia fatorial permitiram estimar a pressão dinâmica para outras condições de operação da caldeira, mas a aplicação dos modelos regredidos é limitada para alguns pontos de medição.
- A análise estatística (ANOVA), apontou valores baixos do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para os pontos da linha 1 (1, 2, 3 e 4) e valores altos para os pontos das linhas 2 e 3 explicando a variação total em torno da média, sendo a diferença explicada pelos resíduos. Os efeitos da variável X2 (registro de ar primário) não foram significativos para o teste  $P$  ( $\alpha=95\%$ ) em nenhum ponto nos modelos matemáticos. A análise estatística dos experimentos foi validada.
- Principal parâmetro que afeta velocidade é abertura do ventilador.

Para continuação deste estudo, são sugeridos como futuros trabalhos:

- Desenvolvimento de uma modelagem em DFC para verificar melhor posicionamento de sensores para avaliação do campo velocidade;
- Extensão do experimento para incluir avaliação do comportamento do escoamento para uma linha de queimadores por vez, associando-se estes casos com amostragens isocinéticas nos testes “a quente”, de forma a averiguar a influência da alimentação de ar no padrão de emissões atmosféricas, principalmente NOx, e CO, e eficiência da caldeira.

- Extensão do experimentos para incluir avaliação da influência da configuração de combustíveis;
- Avaliar da influência do *swirl* dos queimadores sobre a pressão estática nas câmaras de ar primário e secundário.
- Estudo da influência da rotação do aquecedor de ar regenerativo sobre o comportamento do escoamento

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bhasker, C, 2002. Simulation of air flow in the typical boiler windbox segments, *International Journal-Advances in Engineering Software*, **International Journal-Advances in Engineering Software**, vol. 33, p. 793–804.

Calado, V.; Montgomery, D., 2003. **Planejamento de experimentos usando o estatística**, Rio de Janeiro, e-Papers.

Çengel, Y, 2007. **Mecânica dos fluidos- fundamentos e aplicações**, São Paulo, McGraw-Hill.

Chew, V, 1957. **Experimental designs in industry**, New York, John Wiley & Sons, Inc. p.1-58.

Dean, A.; Voss, D., 1999. **Design and Analysis of Experiments**, Springer.

Delmée, Gerard, 1982. **Manual de medição de vazão**, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo.

Devor, R.E.; Chang, T.; Sutherland, J.W, 1992. **Statistical quality design and control – Contemporary concepts and methods**, New Jersey, Prentice Hall, Inc.

Fox, R.W.; Mcdonald, A.T, 2006. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 4. ed. Rio de Janeiro, LTC.

FUPAI, 2007. **Caldeiras a Vapor**, Apostila didática, Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria. Itajubá, 83 pp.

Galdámez, Edwin W.C, 2002. Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos, São Carlos, 133p, **Dissertação de mestrado**, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

IPT, 2004. **Combustão de líquidos**, Apostila didática, Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, 95 pp.

Indrusiak, Maria L.S., 1997. Escoamento turbulento na saída de um duto curvo de seção retangular, **Dissertação de mestrado**, UFRGS.

Joseph, G.; Singer, P.E. 1991. **Combustion Fossil Power**, Copyright, Connecticut,

Lacava, P.T., Alves, A., 2009. Projeto básico de câmaras de combustão, em combustão em turbina a gás, Apostila da **II Escola de Combustão**, Instituto tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 195 pp.

Levine, D.M.; Berenson, M.L.; Stephan, D., 1998. **Estatística: teoria e aplicações**: Traduzido por Teresa Cristina Padilha de Souza e Sergio da Costa cortes, Rio de Janeiro, Ed. Livros Técnicos e Científicos (LTC).

Li, Z.Q.; Fan, S.B.; Liu, G.K.; Yang, X.H.; Chen, Z.C.; Su, W.; 2010. Influence of Staged-Air on Combustion Characteristics and NO<sub>x</sub> Emissions of a 300 MWe Down-Fired Boiler with Swirl Burners, **Fuel**, v.93, pp.160-145.

Macedo, Rose Meire Penha Revoredo de, 2007. Aplicação da Metodologia de planejamento de experimentos para formulação de massas cerâmica para telhas, **Tese de Doutorado**, UFRN.

MHI, 1981. **Steam Generation System – Project Book I**, Manual de Equipamento, propriedade Braskem S.A, 476 pp.

Montgomery, D. C, 2001. **Design and analysis of experiments**, John Wiley & Son.

Montgomery, D.C.; Runger, G.C., 2007. **Applied Statistics And Probability For Engineers**, Hoboken, John Wiley and Sons.

Myers, R.H & Montgomery, D.C., 1995. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments**, Canada, John Wiley & Sons, Inc.

Shames, I.H, 1973. **Mecânica dos fluidos**, , Edgard Blucher, São Paulo.

Steinberg, M.D.; Hunter, W.G., 1984. **Experimental design: review and comment**, Technometrics.

Smith Schneider, P.S. **Medição de pressão em fluidos**. Disponível em: <[www.geste.mecanica.ufrgs.br](http://www.geste.mecanica.ufrgs.br)> Acesso em 22/10/2012.

Smith Schneider, P.S. **Medição de velocidade e vazão de fluidos**. Disponível em: < [www.geste.mecanica.ufrgs.br](http://www.geste.mecanica.ufrgs.br) > Acesso em 22/10/2012.

Werkema, M.C.C.; Aguiar, S, 1996. **Otimização estatística de processos: como determinar a condição de operação de um processo que leva ao alcance de uma meta de melhoria**, Fundação Christiano Ottoni, Belo Horizonte.

Werkema, M.C.C, 1996. **Como estabelecer conclusões com confiança : entendendo inferência estatística**, Fundação Christiano Ottoni, Belo Horizonte.

Werkema, M.C.C.; Aguiar, S, 1996. **Análise de variância: comparação de várias situações**, Fundação Christiano Ottoni, Belo Horizonte.

Werkema, M.C.C.; Aguiar, S, 1996. **Planejamento e análise de experimentos: como identificar e avaliar as principais variáveis influentes em um processo**. Fundação Christiano Ottoni, Belo Horizonte.

White, F.M, 1999. **Mecânica dos fluidos**. 4. ed. Rio de Janeiro, McGraw-Hill.

Xu, M.; Azevedo, J.L.T.; Carvalho, M.G., 2000. Modeling of a front wall fired utility boiler for different operating conditions, **Energy**, v. 29, p. 427-448.

Zhou, Y.; Xu T.; Hui S.; Zhang, M., 2007. Experimental and numerical study on the flow fields in upper furnace for large scale tangentially fired boilers, **Applied Thermal Engineering**, 29 (2009) 732–739.

## APÊNDICE A

Resultados de pressão estática nas câmaras de ar primário e secundário dos testes a quente

Queimador	Teste 1	
	Pressão Estática - Ar Primário (mmca)	Pressão Estática - Ar Secundário (mmca)
Queimador 1	100,00	87,00
Queimador 2	104,00	85,10
Queimador 3	90,00	84,00
Queimador 4	49,00	40,00
Queimador 5	92,00	80,00
Queimador 6	47,00	45,00
Queimador 7	78,00	69,00
Queimador 8	83,00	68,00
Queimador 9	79,00	75,00
Queimador	Teste 2	
	Pressão Estática - Ar Primário (mmca)	Pressão Estática - Ar Secundário (mmca)
Queimador 1	123,50	111,90
Queimador 2	118,17	105,45
Queimador 3	109,67	104,75
Queimador 4	110,17	108,82
Queimador 5	116,67	108,52
Queimador 6	100,83	110,07
Queimador 7	110,00	102,90
Queimador 8	111,00	105,45
Queimador 9	107,33	105,15
Queimador	Teste 3	
	Pressão Estática - Ar Primário (mmca)	Pressão Estática - Ar Secundário (mmca)
Queimador 1	121,14	119,29
Queimador 2	134,86	119,57
Queimador 3	98,71	101,14
Queimador 4	107,57	104,29
Queimador 5	115,29	109,00
Queimador 6	105,00	104,86
Queimador 7	102,57	101,29
Queimador 8	109,14	101,14
Queimador 9	109,29	107,43
Queimador	Teste 4	
	Pressão Estática - Ar Primário (mmca)	Pressão Estática - Ar Secundário (mmca)
Queimador 1	239,43	225,86
Queimador 2	256,43	217,29
Queimador 3	218,86	220,00
Queimador 4	239,86	229,29
Queimador 5	241,14	232,14
Queimador 6	219,29	222,71
Queimador 7	228,43	220,00
Queimador 8	224,57	205,00
Queimador 9	223,57	203,43

Queimador	Teste 5	
	Pressão Estática - Ar Primário (mmca)	Pressão Estática - Ar Secundário (mmca)
Queimador 1	78,00	85,14
Queimador 2	61,57	52,29
Queimador 3	85,57	78,71
Queimador 4	85,29	80,43
Queimador 5	38,14	56,43
Queimador 6	79,00	78,29
Queimador 7	80,29	77,29
Queimador 8	80,57	75,86
Queimador 9	81,86	81,00
Queimador	Teste 6	
	Pressão Estática - Ar Primário (mmca)	Pressão Estática - Ar Secundário (mmca)
Queimador 1	82,00	78,60
Queimador 2	47,80	51,80
Queimador 3	72,00	78,80
Queimador 4	40,00	41,00
Queimador 5	85,80	82,20
Queimador 6	33,60	40,00
Queimador 7	77,80	70,60
Queimador 8	78,40	77,00
Queimador 9	68,80	79,80
Queimador	Teste 7	
	Pressão Estática - Ar Primário (mmca)	Pressão Estática - Ar Secundário (mmca)
Queimador 1	115,60	118,80
Queimador 2	122,60	124,40
Queimador 3	121,40	124,40
Queimador 4	124,20	127,00
Queimador 5	126,80	120,40
Queimador 6	115,60	119,80
Queimador 7	119,80	112,40
Queimador 8	121,80	114,20
Queimador 9	114,60	110,00

**Pressão estática nas câmaras de ar primário e secundário dos testes a frio**

Queimador	Teste 8	
	Pressão Estática - Ar Primário (mmca)	Pressão Estática - Ar Secundário (mmca)
Queimador 1	122,33	106,00
Queimador 2	Registro fechado	Registro fechado
Queimador 3	Registro fechado	Registro fechado
Queimador 4	92,83	109,83
Queimador 5	Registro fechado	Registro fechado
Queimador 6	Registro fechado	Registro fechado
Queimador 7	103,50	97,50
Queimador 8	Registro fechado	Registro fechado
Queimador 9	Registro fechado	Registro fechado

Queimador	Teste 9	
	Pressão Estática - Ar Primário (mmca)	Pressão Estática - Ar Secundário (mmca)
Queimador 1	Registro fechado	Registro fechado
Queimador 2	70,67	105,67
Queimador 3	Registro fechado	Registro fechado
Queimador 4	Registro fechado	Registro fechado
Queimador 5	116,83	104,67
Queimador 6	Registro fechado	Registro fechado
Queimador 7	Registro fechado	Registro fechado
Queimador 8	114,00	104,00
Queimador 9	Registro fechado	Registro fechado
Queimador	Teste 10	
	Pressão Estática - Ar Primário (mmca)	Pressão Estática - Ar Secundário (mmca)
Queimador 1	Registro fechado	Registro fechado
Queimador 2	Registro fechado	Registro fechado
Queimador 3	113,33	100,17
Queimador 4	Registro fechado	Registro fechado
Queimador 5	Registro fechado	Registro fechado
Queimador 6	79,17	105,50
Queimador 7	Registro fechado	Registro fechado
Queimador 8	Registro fechado	Registro fechado
Queimador 9	101,33	114,83
Queimador	Teste 11	
	Pressão Estática - Ar Primário (mmca)	Pressão Estática - Ar Secundário (mmca)
Queimador 1	119,67	113,00
Queimador 2	80,33	113,67
Queimador 3	113,33	113,50
Queimador 4	Registro fechado	Registro fechado
Queimador 5	123,00	111,50
Queimador 6	Registro fechado	Registro fechado
Queimador 7	117,67	111,33
Queimador 8	120,67	116,00
Queimador 9	118,67	129,50

Queimador	Teste 12	
	Pressão Estática - Ar Primário (mmca)	Pressão Estática - Ar Secundário (mmca)
Queimador 1	110,00	107,00
Queimador 2	Registro fechado	Registro fechado
Queimador 3	100,00	107,00
Queimador 4	Registro fechado	Registro fechado
Queimador 5	126,00	127,00
Queimador 6	Registro fechado	Registro fechado
Queimador 7	118,00	113,00
Queimador 8	129,00	114,00
Queimador 9	95,00	120,00
Queimador	Teste 13	
	Pressão Estática - Ar Primário (mmca)	Pressão Estática - Ar Secundário (mmca)
Queimador 1	113,67	122,67
Queimador 2	149,00	108,50
Queimador 3	86,67	100,83
Queimador 4	125,17	121,17
Queimador 5	128,67	121,67
Queimador 6	116,17	124,50
Queimador 7	126,33	119,83
Queimador 8	124,00	121,00
Queimador 9	123,33	122,50
Queimador	Teste 14	
	Pressão Estática - Ar Primário (mmca)	Pressão Estática - Ar Secundário (mmca)
Queimador 1	126,33	118,17
Queimador 2	Registro fechado	Registro fechado
Queimador 3	119,67	111,33
Queimador 4	123,17	117,67
Queimador 5	Registro fechado	Registro fechado
Queimador 6	111,17	116,33
Queimador 7	121,00	113,33
Queimador 8	121,50	113,33
Queimador 9	112,83	118,50

## APÊNDICE B

### Resultados de pressão de estagnação no trecho horizontal

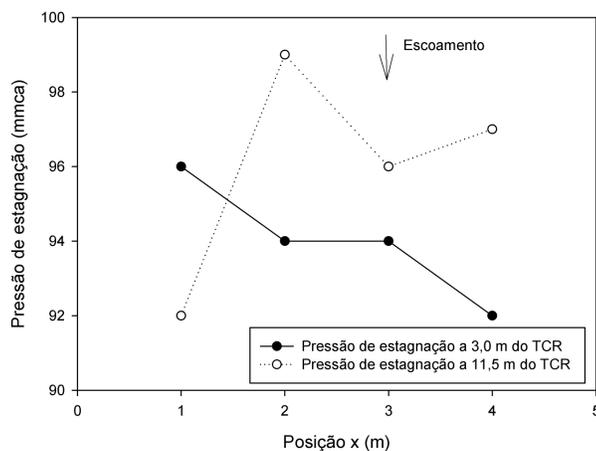


Figura B.1 - Pressão de estagnação no trecho horizontal no teste 1

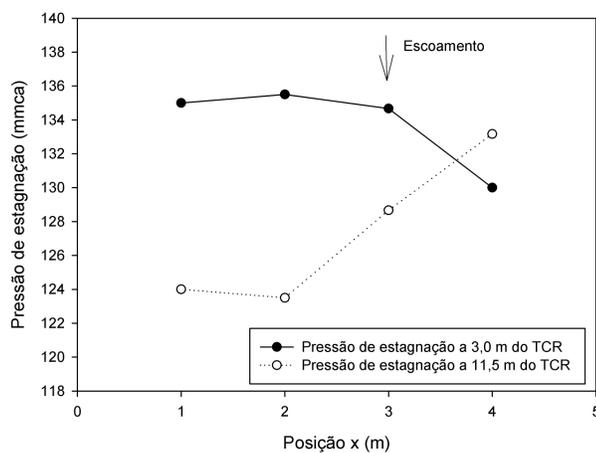


Figura B.2 - Pressão de estagnação no trecho horizontal no teste 2

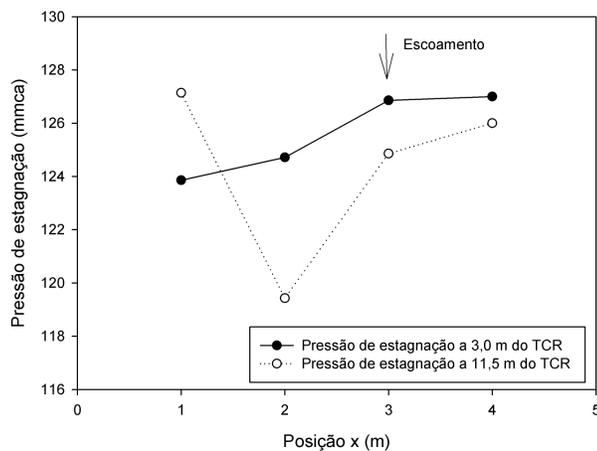


Figura B.3 - Pressão de estagnação no trecho horizontal no teste 3

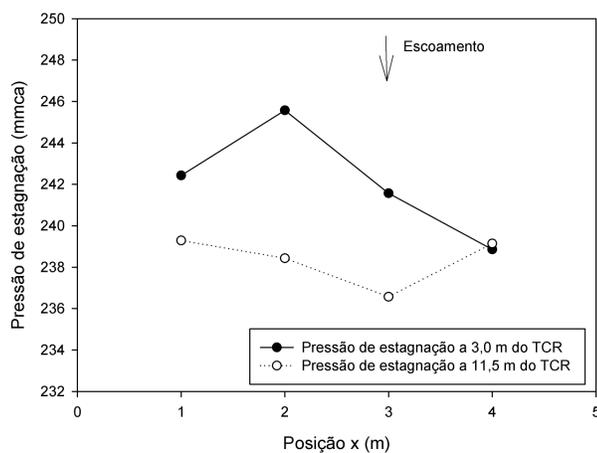


Figura B.4 - Pressão de estagnação no trecho horizontal no teste 4

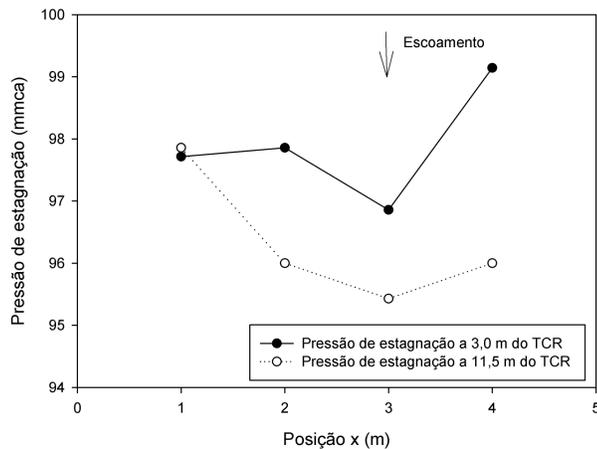


Figura B.5 - Pressão de estagnação no trecho horizontal no teste 5

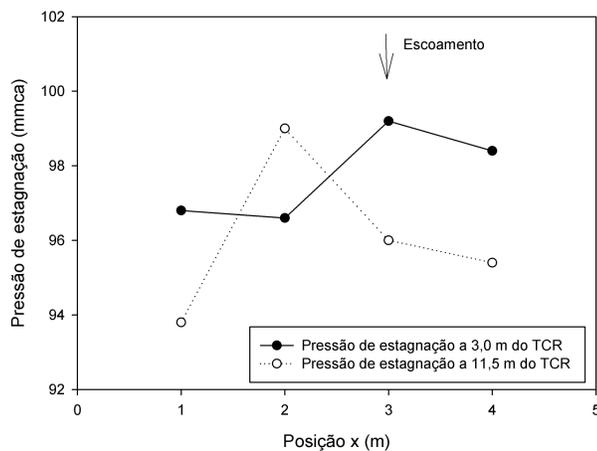


Figura B.6 - Pressão de estagnação no trecho horizontal no teste 6

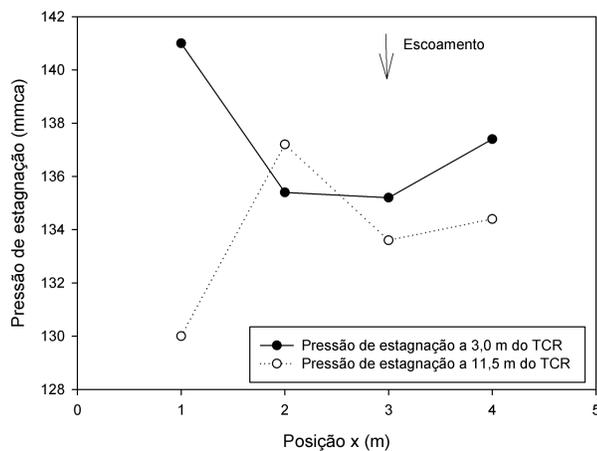


Figura B.7 - Pressão de estagnação no trecho horizontal no teste 7

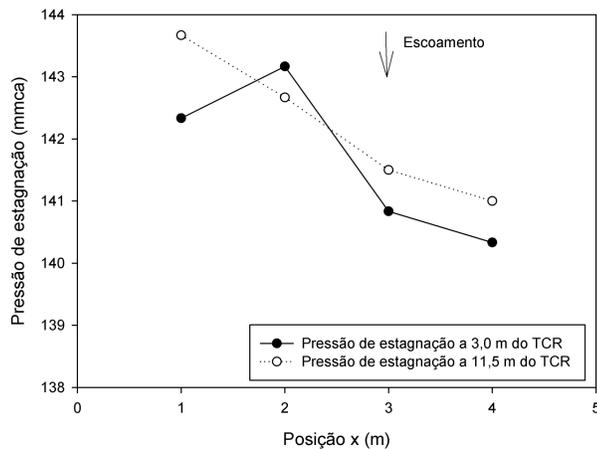


Figura B.8 - Pressão de estagnação no trecho horizontal no teste 8

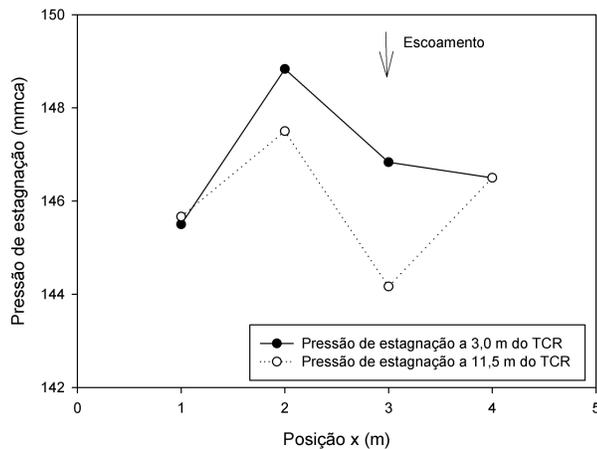


Figura B.9 - Pressão de estagnação no trecho horizontal no teste 9

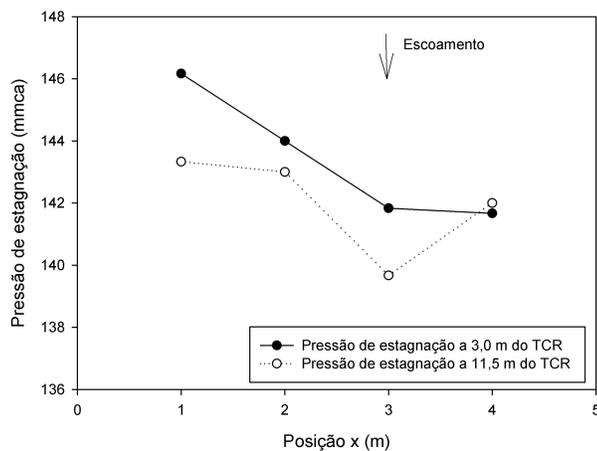


Figura B.10 - Pressão de estagnação no trecho horizontal no teste 10

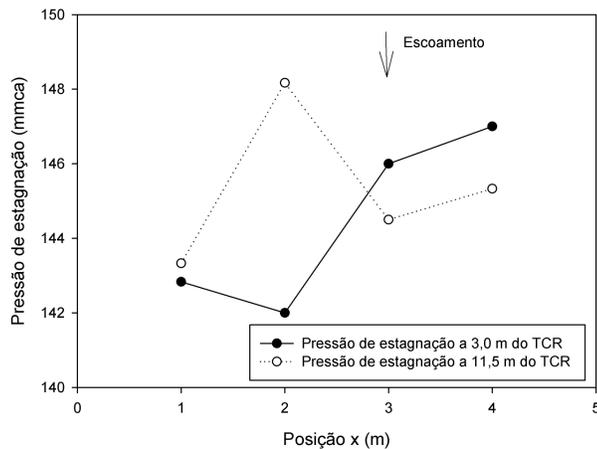


Figura B.11 - Pressão de estagnação no trecho horizontal no teste 11

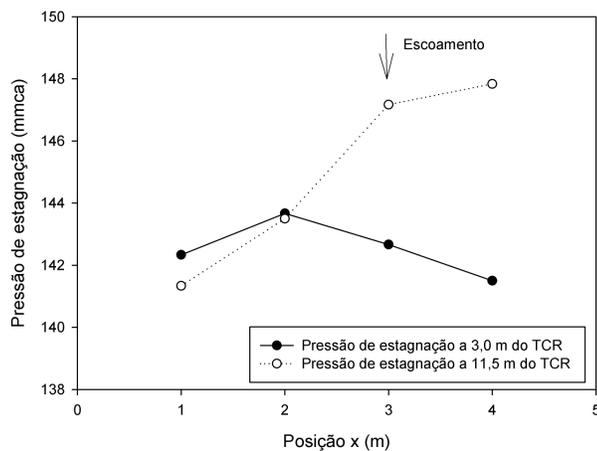


Figura B.12 - Pressão de estagnação no trecho horizontal no teste 12

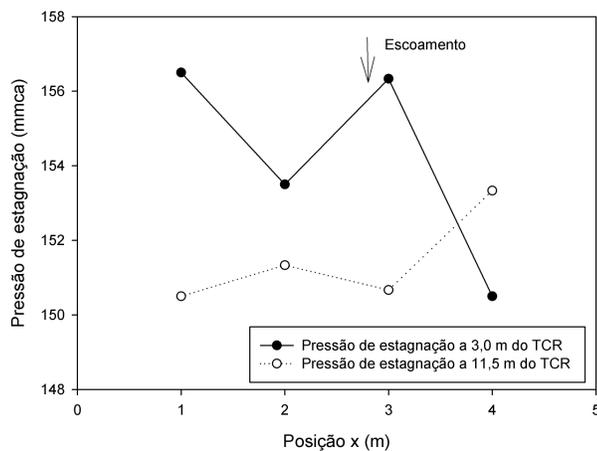


Figura B.13 - Pressão de estagnação no trecho horizontal no teste 13

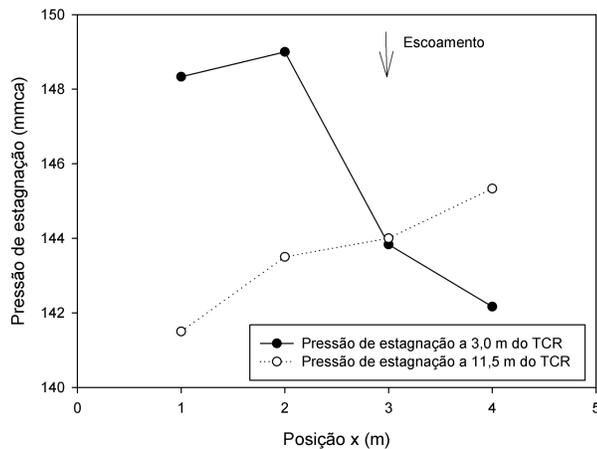


Figura B.14 - Pressão de estagnação no trecho horizontal no teste 14

## APÊNDICE C

### Resultados de pressão dinâmica no trecho vertical da caixa de ar

Tabela C.1 – Resultados de pressão dinâmica nos testes de 1 a 14 (mmca)

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10	Teste 11	Teste 12	Teste 13	Teste 14
Ponto 1	9,0	-10,8	-9,7	11,3	-6,7	1,0	0,0	-0,5	0,0	0,0	-0,5	-0,3	0,5	-0,5
Ponto 2	3,0	8,7	7,3	21,9	1,4	3,0	-0,3	0,5	-0,5	0,3	-0,3	0,0	0,0	0,0
Ponto 3	17,8	13,6	7,7	27,7	6,1	-0,3	0,3	0,3	0,0	-0,5	1,0	-0,5	-0,3	0,5
Ponto 4	12,5	1,3	6,3	8,4	2,3	0,5	-0,3	0,3	0,3	-0,3	0,5	0,5	-0,3	0,3
Ponto 5	7,5	2,5	1,1	1,0	10,6	1,3	1,8	2,0	0,8	0,5	1,8	1,8	2,5	1,8
Ponto 6	6,9	2,2	6,4	8,3	9,0	1,8	2,0	1,0	3,0	4,0	6,5	2,0	3,5	1,5
Ponto 7	21,0	9,6	8,6	14,4	4,9	3,0	6,8	4,3	3,5	2,0	6,3	3,5	8,0	5,0
Ponto 8	10,0	9,2	1,6	3,0	1,6	0,5	1,8	1,3	0,5	2,0	2,8	2,5	2,0	1,8
Ponto 9	20,0	14,8	0,9	11,9	3,7	3,5	7,0	7,3	4,3	4,0	7,8	6,0	9,5	8,0
Ponto 10	20,0	12,2	16,7	35,1	7,1	6,0	10,5	5,0	7,5	9,0	13,0	9,0	12,5	8,5
Ponto 11	22,0	27,1	17,6	51,9	11,1	10,3	18,5	10,0	13,5	12,0	17,5	16,0	23,0	18,8
Ponto 12	18,0	21,6	8,0	33,1	6,7	4,8	7,0	3,8	5,0	6,5	6,5	7,5	8,5	7,3

## APÊNDICE D

### Resultados de análise de variância (ANOVA) dos pontos (testes 15 a 50)

Tabela D.1 – Análise de variância do Ponto 1

Fonte de variação	G.L	Soma Quadrado	Quadrado Médio	F <sub>calc</sub>	p
A: Damper do VT	1	0,3164	0,3164	3,96	0,078
B: Damper Ar Prim	1	0,0977	0,0977	1,22	0,297
C: Damper Secundário	1	0,0977	0,0977	1,22	0,297
AB	1	0,0039	0,0039	0,05	0,830
AC	1	0,0039	0,0039	0,05	0,830
BC	1	0,0352	0,0352	0,44	0,524
ABC	1	0,0977	0,0977	1,22	0,297
Curvatura	1	0,0352	0,0352	0,44	0,524
Erro Residual	9	0,7188	0,0799		

Nível de significância: 95%

Tabela D.2 – Análise de variância do Ponto 2

Fonte de variação	G.L	Soma Quadrado	Quadrado Médio	F <sub>calc</sub>	p
A: Damper do VT	1	0,8789	0,8789	3,89	0,080
B: Damper Ar Prim	1	0,1914	0,1914	0,85	0,381
C: Damper Secundário	1	0,0352	0,0352	0,16	0,702
AB	1	0,4727	0,4727	2,09	0,182
AC	1	0,1914	0,1914	0,85	0,381
BC	1	0,1914	0,1914	0,85	0,381
ABC	1	0,4727	0,4727	2,09	0,182
Curvatura	1	0,0525	0,0525	0,23	0,641
Erro Residual	9	2,0313	0,2257		

Nível de significância: 95%

Tabela D.3 – Análise de variância do Ponto 3

Fonte de variação	G.L	Soma Quadrado	Quadrado Médio	F <sub>calc</sub>	p
A: Damper do VT	1	0,5625	0,5625	5,59	0,042
B: Damper Ar Prim	1	0,0000	0,0000	*	*
C: Damper Secundário	1	0,0000	0,0000	*	*
AB	1	0,0625	0,0625	0,62	0,451
AC	1	0,0000	0,0000	*	*
BC	1	0,0625	0,0625	0,62	0,451
ABC	1	0,0625	0,0625	0,62	0,451
Curvatura	1	0,0278	0,0278	0,28	0,612
Erro Residual	9	0,90625	0,100694		

Nível de significância: 95%

Tabela D.4 – Análise de variância do Ponto 4

Fonte de variação	G.L	Soma Quadrado	Quadrado Médio	F <sub>calc</sub>	p
A: Damper do VT	1	0,0352	0,0352	0,46	0,515
B: Damper Ar Prim	1	0,0039	0,0039	0,05	0,826
C: Damper Secundário	1	0,0352	0,0352	0,46	0,515
AB	1	0,0977	0,0977	1,28	0,287
AC	1	0,0352	0,0352	0,46	0,515
BC	1	0,0352	0,0352	0,46	0,515
ABC	1	0,0977	0,0977	1,28	0,287
Curvatura	1	0,0977	0,0977	1,28	0,287
Erro Residual	9	0,6875	0,0764		

Nível de significância: 95%

Tabela D.5 – Análise de variância do Ponto 5

Fonte de variação	G.L	Soma Quadrado	Quadrado Médio	F <sub>calc</sub>	p
A: Damper do VT	1	21,973	21,973	234	0,000
B: Damper Ar Prim	1	0,0352	0,0352	0,37	0,555
C: Damper Secundário	1	0,8789	0,8789	9,37	0,014
AB	1	0,0039	0,0039	0,04	0,843
AC	1	0,1914	0,1914	2,04	0,187
BC	1	0,0352	0,0352	0,37	0,555
ABC	1	0,0039	0,0039	0,04	0,843
Curvatura	1	0,5942	0,5942	6,34	0,033
Erro Residual	9	0,8437	0,0937		

Nível de significância: 95%

Tabela D.6 – Análise de variância do Ponto 6

Fonte de variação	G.L	Soma Quadrado	Quadrado Médio	F <sub>calc</sub>	p
A: Damper do VT	1	58,141	58,141	72,2	0,000
B: Damper Ar Prim	1	0,3906	0,3906	0,48	0,504
C: Damper Secundário	1	0,3906	0,3906	0,48	0,504
AB	1	0,0156	0,0156	0,02	0,892
AC	1	2,6406	2,6406	3,28	0,104
BC	1	0,3906	0,3906	0,48	0,504
ABC	1	0,0156	0,0156	0,02	0,892
Curvatura	1	0,6267	0,6267	0,78	0,401
Erro Residual	9	7,2500	0,8056		

Nível de significância: 95%

Tabela D.7 – Análise de variância do Ponto 7

Fonte de variação	G.L	Soma Quadrado	Quadrado Médio	F <sub>calc</sub>	p
A: Damper do VT	1	546,4	546,4	894	0,000
B: Damper Ar Prim	1	0,391	0,391	0,64	0,445
C: Damper Secundário	1	4,516	4,516	7,39	0,024
AB	1	0,141	0,141	0,23	0,643
AC	1	1,891	1,891	3,09	0,112
BC	1	0,141	0,141	0,23	0,643
ABC	1	0,391	0,391	0,64	0,445
Curvatura	1	2,641	2,641	4,32	0,067
Erro Residual	9	5,500	0,611		

Nível de significância: 95%

Tabela D.8 – Análise de variância do Ponto 8

Fonte de variação	G.L	Soma Quadrado	Quadrado Médio	F <sub>calc</sub>	p
A: Damper do VT	1	37,516	37,516	38,3	0,000
B: Damper Ar Prim	1	0,0625	0,0625	0,06	0,806
C: Damper Secundário	1	0,0625	0,0625	0,06	0,806
AB	1	0,1406	0,1406	0,14	0,713
AC	1	0,1406	0,1406	0,14	0,713
BC	1	0,2500	0,2500	0,26	0,625
ABC	1	0,1406	0,1406	0,14	0,713
Curvatura	1	0,4444	0,4444	0,45	0,517
Erro Residual	9	8,8125	0,9792		

Nível de significância: 95%

Tabela D.9 – Análise de variância do Ponto 9

Fonte de variação	G.L	Soma Quadrado	Quadrado Médio	F <sub>calc</sub>	p
A: Damper do VT	1	1093	1093	1980	0,000
B: Damper Ar Prim	1	0,32	0,32	0,57	0,468
C: Damper Secundário	1	1,41	1,41	2,55	0,144
AB	1	1,13	1,13	2,04	0,187
AC	1	0,47	0,47	0,86	0,379
BC	1	0,32	0,32	0,57	0,468
ABC	1	0,66	0,66	1,20	0,303
Curvatura	1	5,74	5,74	10,4	0,010
Erro Residual	9	4,97	0,55		

Nível de significância: 95%

Tabela D.10 – Análise de variância do Ponto 10

Fonte de variação	G.L	Soma Quadrado	Quadrado Médio	F <sub>calc</sub>	p
A: Damper do VT	1	2274	2274	406	0,000
B: Damper Ar Prim	1	16,5	16,5	2,94	0,120
C: Damper Secundário	1	0,19	0,19	0,03	0,858
AB	1	15,5	15,5	2,76	0,131
AC	1	0,32	0,32	0,06	0,818
BC	1	4,25	4,25	0,76	0,406
ABC	1	3,75	3,75	0,67	0,434
Curvatura	1	0,59	0,59	0,11	0,752
Erro Residual	9	50,5	5,61		

Nível de significância: 95%

Tabela D.11 – Análise de variância do Ponto 11

Fonte de variação	G.L	Soma Quadrado	Quadrado Médio	F <sub>calc</sub>	p
A: Damper do VT	1	5466,750	5466,750	6223,02	0,000
B: Damper Ar Prim	1	0,000	0,000	0,00	0,948
C: Damper Secundário	1	2,070	2,070	2,35	0,159
AB	1	0,000	0,000	0,00	0,948
AC	1	0,320	0,320	0,36	0,563
BC	1	0,880	0,880	1,00	0,343
ABC	1	1,130	1,130	1,29	0,286
Curvatura	1	63,670	63,670	72,47	0,000
Erro Residual	9	7,910	0,880		

Nível de significância: 95%

Tabela D.12 – Análise de variância do Ponto 12

Fonte de variação	G.L	Soma Quadrado	Quadrado Médio	F <sub>calc</sub>	p
A: Damper do VT	1	659,85	659,85	4635	0,000
B: Damper Ar Prim	1	0,0980	0,0980	0,69	0,429
C: Damper Secundário	1	0,0040	0,0040	0,03	0,872
AB	1	0,0040	0,0040	0,03	0,872
AC	1	0,0980	0,0980	0,69	0,429
BC	1	0,0350	0,0350	0,25	0,631
ABC	1	0,0040	0,0040	0,03	0,872
Curvatura	1	3,2850	3,2850	23,08	0,001
Erro Residual	9	1,2810	0,1420		

Nível de significância: 95%