



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
Centro de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção
Departamento de Engenharia Química

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE IGNIÇÃO LANÇA-
CHAMAS PARA QUEIMADORES POROSOS**

AMANDA RAFAELE SERPA CAMELO

Fortaleza – Ceará
2009

AMANDA RAFAELE SERPA CAMELO

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE IGNIÇÃO LANÇA- CHAMAS PARA QUEIMADORES POROSOS

Projeto Final de Curso, apresentado à Universidade Federal do Ceará através do Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção e do Departamento de Engenharia Química, como requisito para obtenção de título de Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. William Magalhães Barcellos, D.Sc.

FORTALEZA

2009

AMANDA RAFAELE SERPA CAMELO

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE IGNIÇÃO LANÇA- CHAMAS PARA QUEIMADORES POROSOS

Esta Monografia foi julgada como requisito para obtenção do Grau em Engenharia Química, e aprovada em sua forma final pelos Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção e Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Ceará.

Aprovada em ____ / ____ / ____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. William Magalhães Barcellos (Orientador)
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Fabiano André Narciso Fernandes
Universidade Federal do Ceará

*Aos meus queridos pais,
Maria Cleonice e Francisco Orlando.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre repor minhas forças e me fazer superar todos os obstáculos.

Aos meus pais pelo apoio essencial durante toda minha vida, pois sem eles o percurso até essa conquista seria muito mais difícil.

Ao meu amado Heladio pela paciência e compreensão neste período tão importante de minha vida.

Aos integrantes do LACER (Laboratório de Combustão e Energias Renováveis) cuja ajuda foi imprescindível para a realização deste trabalho.

Ao professor Eurico Belo Torres e aos integrantes do Laboratório de Análise Cromatográfica pela caracterização da amostra utilizada neste trabalho.

À professora Dra. Maria Eugênia Vieira da Silva e os integrantes do Laboratório de Energia Solar pelo auxílio com ferramentas para corte dos tubos de quartzo.

Ao pessoal da Oficina Polares pelo trabalho de confecção das peças.

Ao professor Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha e ao Engenheiro Olímpio Carneiro pelo apoio com o Software ANSYS CFX.

Ao professor Dr. William Magalhães Barcellos por todo o tempo dedicado ao trabalho realizado.

Aos meus grandes amigos dos cursos de Engenharia Química e de Engenharia Mecânica da UFC cujos momentos compartilhados, tanto os bons quanto os de maior dificuldade, me ajudaram a ampliar o alcance da visão.

“Nunca andes pelo caminho traçado,
pois ele conduz somente onde outros já foram...”

Graham Bell

RESUMO

O Laboratório de Combustão e Energias Renováveis (LACER/PPGEM/UFC) vem desenvolvendo caldeiras e aquecedores de água utilizando uma tecnologia de base, a “Combustão em Meios Porosos”, que tem como característica ser um processo de alta eficiência e baixas emissões. Entretanto, os queimadores porosos que constituem esses equipamentos estão ainda em fase de desenvolvimento, principalmente quanto à questão do sistema de ignição do processo de combustão, que não possibilita a aplicação efetiva dos mesmos em sistemas térmicos industriais. A exemplo do que vem sendo utilizado em vários laboratórios de pesquisa em todo o mundo, o processo de ignição em queimadores porosos é realizado por aquecimento de sua matriz porosa por fio resistivo, o que traz uma série de inconvenientes com respeito aos custos de manutenção e operação. Buscando uma solução para essa questão, foi desenvolvido um projeto robusto e econômico de sistema de ignição do tipo “Lança-Chamas” que é constituído basicamente de uma pré-câmara com vela de centelha e um tubo de quartzo de lançamento da chama. Com esse sistema é feito o aquecimento do meio poroso do queimador da Caldeira/Aquecedor, até que seja atingida a temperatura de combustão espontânea da mistura ar-combustível. Para este estudo foi desenvolvido um protótipo, em escala de laboratório, para uma investigação experimental, com o apoio de um trabalho de simulação, utilizando o software “ANSYS CFX”. Com a simulação, caracterizou-se o escoamento dos gases ao longo de todo o corpo do protótipo do sistema de ignição, o que ajudou a compreender os fenômenos relacionados à onda de combustão que se propaga desde a sua origem, quando do centelhamento da vela de ignição (pré-câmara), até a mesma instalar-se no interior do queimador poroso. O objetivo deste trabalho foi, então, conhecer o sistema de ignição em estudo, utilizando um dos três tubos lança-chamas de quartzo selecionados, para avaliar a geometria da pré-câmara, a fim de definir as condições de estabilidade do processo de aquecimento do queimador. Além disso, objetivou-se verificar a influência dos principais parâmetros de operação, a razão de equivalência e a velocidade da mistura ar-combustível, sobre a estabilidade da reação.

Palavras-chaves: Combustão em Meios Porosos, Sistema de Ignição Lança-Chamas, Simulação de Escoamento em CFX.

ABSTRACT

The Laboratory of Combustion and Renewable Energy (LACER/ PPGEM/UFC) has developed boilers and water heaters utilising a base technology, "Porous Media Combustion", which has as characteristic to be a high-efficiency and low-emission process. However, the porous burners that constitute such equipments are still in developing stage, particularly concerning the issue of the ignition system of the combustion process, which does not allow their effective application to industrial thermal systems. As it has been used by several research laboratories in the all world, the porous burner's ignition process is carried out by heating of the porous matrix through a resistive wire, which presents a number of drawbacks with respect to the costs of maintenance and operation. Seeking a solution for this problem, a low-cost robust design of ignition system type "Flame-thrower" has been developed, which is basically a pre-chamber with a spark plug and a quartz flame thrower tube. With this system, the boiler/heater's porous burner heating is performed until that the spontaneous combustion temperature of the fuel-air mixture takes place. For this study, a laboratory-scale prototype has been developed in order for an experimental investigation, with the support of a work simulation, using the software ANSYS CFX. Through the simulation, the gas flows were characterized along the all ignition system prototype's body, which helped learning about the phenomena related to the combustion wave that propagates itself since its origem on the sparking of the spark plug (pre-chamber) up to it install itself in porous burner. The objetive of this work was then to know ignition system on study, utilizing one of the three selected quartz flame-thrower tubes to evaluate the pre-chamber's geometry, in order to define the stability conditions of the burner's heating process. Besides, it was desired to verify the influence of the principal operation parameters, equivalence ratio and gas flow velocity of air-fuel mixture, on the reaction stability.

Keywords: Porous Media Combustion, Flame-Thrower Ignition System, CFX Simulation

NOMENCLATURA

LETRAS ALFABÉTICAS

A	Área (m ²)
d	Diâmetro do tubo de quartzo (mm)
(F/A) _{Real} ^{GásNatural}	Razão Combustível-Ar Real para Gás Natural
(F/A) _{Teórico} ^{GásNatural}	Razão Combustível-Ar Teórico para Gás Natural
m _{Ar}	Massa de ar (g)
m _{Gás Natural}	Massa de gás natural (g)
m _{Total}	Massa de gás natural (g)
\dot{m}	Vazão mássica (kg/s)
P	Pressão (bar)
PM _{Ar}	Peso molecular do ar (g/mol)
R	Constante dos gases específica (KJ/kg K)
\bar{R}	Constante dos gases (KJ/ kmol K)
T	Temperatura (K)
\dot{V}	Vazão volumétrica (m ³ /s)
V	Velocidade (m/s)
v	Volume (m ³ /kg)

LETRAS GREGAS

Φ	Razão de equivalência
ρ	Densidade (kg/m ³)

SIGLAS

CF	Combustão de Filtração
CMP	Combustão Meios Porosos
LACER	Laboratório de Combustão e Energias Renováveis

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Lança-chamas "Zippo" da Marinha Americana.....	19
Figura 3.2 Esquema de funcionamento de um lança-chamas portátil.....	20
Figura 4.1 Desenho esquemático de um queimador volumétrico típico.....	25
Figura 4.2 Desenho esquemático de um ignitor próximo ao aquecimento.....	26
Figura 4.3 Sistema de ignição inserido no meio poroso.....	27
Figura 4.4 Detalhe do sistema de ignição inserido no meio poroso.....	27
Figura 4.5 Sistema de ignição por chama piloto.....	28
Figura 4.6 Foto da Caldeira Superadiabática instalada no LACER.....	28
Figura 4.7 Fotos do sistema de aquecimento utilizado na Caldeira Superadiabática instalada.....	29
Figura 5.1 Geometria interna do escoamento.....	32
Figura 5.2 Tubos de quartzo selecionados para estudo.....	33
Figura 5.3 Linhas de corrente do tubo de 1/2".....	35
Figura 5.4 Linhas de corrente do tubo de 5/8".....	35
Figura 5.5 Linhas de corrente do tubo de 3/4".....	36
Figura 5.6 y^+ nas paredes do tubo de 1/2".....	36
Figura 5.7 y^+ nas paredes do tubo de 5/8".....	36
Figura 5.8 y^+ nas paredes do tubo de 3/4".....	37
Figura 5.9 Campo de velocidade do tubo de 1/2".....	37
Figura 5.10 Campo de velocidade do tubo de 5/8".....	38
Figura 5.11 Campo de velocidade do tubo de 3/4".....	38
Figura 5.12 Bancada de teste da primeira fase do projeto.....	40
Figura 5.13 Detalhamento em corte da pré-montagem na primeira etapa do projeto.....	41
Figura 5.14 Detalhamento em corte da pré-montagem na segunda etapa do projeto.....	42
Figura 5.15 Sistema de Circulação de Ar.....	43
Figura 5.16 Sistema de Circulação de Água.....	44
Figura 5.17 Sistema de Circulação de Combustível.....	44
Figura 5.18 Sistema Elétrico de Ignição.....	45
Figura 7.1 Sistema em funcionamento.....	55
Figura 7.2 Comparativo entre as temperaturas de aquecimento através do Sistema Lança-Chamas e por Resistência Elétrica <i>versus</i> tempo.....	55
Figura A.1 Aquecedor na fase inicial.....	60
Figura A.2 Aquecedor montado na bancada de teste.....	60
Figura A.3 Aquecedor na bancada de teste com isolamento e instrumentos.....	61
Figura A.4 Aquecedor pronto para operação.....	61
Figura A.5 Detalhe da Válvula de Controle do Processo.....	62

Figura A.6 Detalhe dos rotômetros na fase de teste	62
Figura A.7 Detalhe do Sistema de Ignição	63
Figura A.8 Aquecedor com Sistema de Ignição Lança-Chamas em operação.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 Condições de fluxo de entrada.....	34
Figura 6.1 Valores brutos das amostras da análise cromatografia gasosa.....	49
Figura 6.2 Porcentagem de cada amostra da análise cromatografia gasosa	50
Figura 6.3 Composição do gás natural adotada para efeito de cálculos	50
Figura 6.4 Cálculo das razões ar-combustível para partida e operação com tubo diâmetro 3/4”	52

ÍNDICE

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
NOMENCLATURA.....	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	15
CAPÍTULO 2 - OBJETIVOS.....	17
CAPÍTULO 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1 - Histórico dos Sistemas Lança-Chamas	18
3.2 - Lança-Chamas Convencionais	19
3.2 - Lança-Chamas Portáteis.....	19
CAPÍTULO 4 - FUNDAMENTOS DA TECNOLOGIA DE BASE - "COMBUSTÃO EM MEIOS POROSOS.....	22
4.1 - Tipos de Queimadores.....	23
4.1.1 - Queimadores Radiantes.....	24
4.1.2 - Queimadores Volumétricos.....	24
4.2 - Sistema de Ignição Desenvolvidos para Combustão de Filtração.....	25
4.3 - Caldeira Instalada no LACER.....	28
CAPÍTULO 5 - METODOLOGIA.....	30
5.1 - Aspectos de Projeto	30
5.2 - Simulação do Processo no Sistema de Ignição	33
5.2.1 - Resultados e Comentários	35
5.3 - Aparato Experimental	38
5.3.1 - Bancada de Pesquisa com Protótipo do Sistema de Ignição Lança- Chamas	39
5.3.2 - Aquecedor de Queimador Poroso com Sistema de Ignição Lança-Chamas	41
5.3.3 - Aspectos Funcionais e Operação	42
5.4 - Instrumentos	45
5.4.1 - Termopares.....	46
5.4.2 - Rotâmetros	46
5.4.3 - Sistema de Aquisição de Dados	47
CAPÍTULO 6 – ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS DE OPERAÇÃO	49
CAPÍTULO 7 – DISCUSSÕES	53

CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES.....	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
ANEXOS	60
Anexo 1 – Fotos das Etapas de Montagem	60

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Uma Caldeira Superadiabática foi desenvolvida no Laboratório de Combustão e Energia Renováveis (LACER) Universidade Federal do Ceará (Barcellos, *et al.*, 2006), na qual é aplicada uma tecnologia não-convencional para concepção do seu projeto construtivo, a “Combustão de Filtração”(CF). Essa tecnologia, também conhecida como “Combustão em Meios Porosos”, permite desenvolver um sistema térmico eficiente com uma operação mais limpa, porque traz como resultado menor índice de emissões de NO_x e CO_x (Kennedy, *et al.*, 1995).

A CF é basicamente a combustão ocorrendo nos interstícios de um material poroso (inerte ou catalítico). Esse material preenche a câmara de combustão total ou parcialmente, mudando significativamente os fenômenos presentes no processo. O meio poroso, que pode ser constituído de diferentes materiais (alumina, quartzo, carbetos de silício, etc.) (Kaviany, 1995); (Barra, *et al.*, 2003), modifica os efeitos de convecção e radiação de calor dentro da câmara de combustão e introduz um outro processo de transferência de calor, a condução.

A combustão em um meio poroso é um processo interno auto-organizado de recuperação de calor em que parte da energia, que seria normalmente liberada pela exaustão com os gases de descarga, é recirculada na câmara de combustão (dentro do meio poroso). Esse meio armazena energia, que parte é absorvida por condução e radiação em regiões próximas à zona de reação, e parte é transportada por convecção através dos gases de combustão que, ao passar por um meio poroso de alta capacidade térmica, realiza um processo de intensa transferência de calor. A Combustão em Meios Porosos mantém uma distribuição de temperatura favorável à extração de energia, pois inserindo trocadores de calor nas extremidades do berço poroso resulta em um aquecedor alternativo de alta-eficiência.

Contudo, essa caldeira desenvolvida enfrenta problemas operacionais para a aplicação prática/efetiva em sistemas térmicos comerciais, considerando o fato de ser necessário o pré-aquecimento do meio poroso para a auto-ignição da mistura ar-combustível. Atualmente, a ignição é realizada através do aquecimento por uma resistência elétrica, que envolve todo o berço poroso longitudinalmente, sendo esse um processo que demanda tempo, consumo de energia, desgaste físico dos componentes do equipamento, dentre outros. Observa-se que o uso diário da Caldeira Superadiabática tem resultado em ciclos de manutenção corretiva, a

cada 5 ou 6 meses de operação, devido ao rompimento do fio resistivo principalmente próximo às regiões do queimador, onde se instala a zona de reação.

Alguns pesquisadores (Brenner *et al.*, 2002), tentando lidar com essa questão, têm optado pela mudança da geometria da matriz porosa para facilitar a ignição do processo de combustão. Quando há a preocupação de transformar um sistema de laboratório em produto de utilidade, a maioria dos projetistas de reatores porosos enfrenta dificuldades para desenvolver sistemas de ignição adequados, particularmente para o caso dos queimadores volumétricos. Diferentemente dos queimadores radiantes, que tem a matriz porosa exposta com fácil acesso para ignitar a mistura ar-combustível, os queimadores volumétricos são mais complexos em termos de projeto, porque o confinamento da matriz porosa em um espaço físico limitado dificulta o acesso para instalar um sistema de ignição simples e robusto, suportando temperaturas elevadas.

Diante das restrições das tecnologias utilizadas atualmente, surgiu o interesse em desenvolver um sistema com uma tecnologia apropriada à Caldeira Superadiabática e, com isso, construir uma nova concepção de sistema de ignição. O sistema de ignição em desenvolvimento segue, então, o princípio do lança-chamas, mas com peculiaridades que o tornam distinto dos equipamentos lança-chamas convencionais. Em que, dentre elas, destaca-se a distância do sistema elétrico da região de aquecimento, o que evita desgaste dos componentes.

Para desenvolver uma frente de chama a fim de lançá-la no meio poroso construiu-se uma pré-câmara, para iniciar a combustão introduzindo um sistema de centelhamento. Essa pré-câmara fica localizada em posição distante do corpo da caldeira, tornando-a mais robusta, sendo este o principal aspecto vantajoso desse sistema de ignição, porque minimiza significativamente a necessidade de desmontagens periódicas para manutenção. O sistema de ignição original instalado na caldeira depende do fio resistivo, sendo necessária sua substituição por ter uma vida útil limitada. O sistema de ignição em desenvolvimento pode ser considerado uma tecnologia com certo grau de amadurecimento, a ponto de adaptá-la a partir de um protótipo de pesquisa em laboratório para o emprego em um produto de aplicação prática de interesse da sociedade, no meio industrial e residencial.

CAPÍTULO 2 – OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento experimental de um sistema de ignição para queimadores porosos visando desenvolver um sistema eficaz para o início de operação.

Esse estudo foi também desenvolvido com alguns objetivos específicos, tais como:

- Caracterização do escoamento e camada-limite na câmara do sistema de ignição, definindo o regime laminar-turbulento, etc.;
- Definição da influência dos parâmetros de operação, velocidade da mistura ar-combustível e razão de equivalência, sobre o processo de aquecimento do reator.
- Estudo da interferência do sistema de ignição na estabilidade de operação do aquecedor de água de queimador poroso;
- Registro visual da propagação da frente de chama ao longo do sistema de ignição;
- Determinação dos parâmetros de projeto de sistema de ignição;

CAPÍTULO 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Histórico dos Sistemas Lança-Chamas

O crédito pelo desenvolvimento do primeiro lança-chamas é geralmente dado ao alemão Richard Fiedler (Richardson, 2004), o qual submeteu os modelos do seu “*Flammenwerfer*” para avaliação ao exército alemão em 1901.

O modelo mais significativo que ele submeteu foi um aparelho portátil de um só homem, que consistia num único cilindro medindo cerca de 1.2 metros de altura, dividido na horizontal por um gás pressurizado na secção inferior e com um óleo inflamável na secção superior. Ao carregar numa alavanca, o gás forçava o líquido a sair através de um tubo de borracha e a passar por um simples dispositivo de ignição numa saída de aço. A arma podia projetar um jato inflamável e enormes nuvens de fumo numa área de 18 metros com dois minutos de tempo de utilização, em que o aparelho era de um único disparo, para o contínuo funcionamento.

Só em 1911 (Richardson, 2004), o exército alemão aceitou o aparelho, criando um regime especialista de doze companhias equipadas com “*Flammenwerferapparate*”. Embora o exército alemão estivesse equipado com esta arma, o lança-chamas não foi utilizado na Primeira Guerra Mundial até fevereiro de 1916, quando foi utilizado contra as forças francesas em Verdun e contra as trincheiras britânicas em Hooge.

Os lança-chamas foram intensamente utilizados na Segunda Guerra Mundial, sendo que a Grã-Bretanha desenvolveu sistemas portáteis. Os fuzileiros norte-americanos utilizaram lança-chamas M2A1-7, tornando-os úteis contra trincheiras ocupadas pelos japoneses no Pacífico. Os alemães utilizaram consideravelmente o lança-chamas, com o nome de “*Flammenwerfer 35*” durante a invasão do Leste Europeu.

3.2 Lança-Chamas Convencionais

Um lança-chamas convencional é um aparelho mecânico desenhado para projetar uma chama longa e controlável. Alguns gêneros, incluindo os lança-chamas militares mais comuns, projetam um líquido inflamável, enquanto outros projetam um gás inflamável. É utilizado pelas forças militares e por civis que precisem de uma chama controlada. Muitos lança-chamas, não militares, não utilizam um líquido inflamável, mas em vez disso, um gás inflamável de alta pressão, tais como, gás propano ou gás natural; que são considerados mais seguros para utilização agrícola, industrial, ou de entretenimento.



Figura 3.1 - Lança-chamas "Zippo" da Marinha Americana. (Departamento de Defesa dos Estados Unidos)

3.3 Lança-chamas portáteis

O diagrama abaixo exemplifica como um lança-chamas portátil funciona.

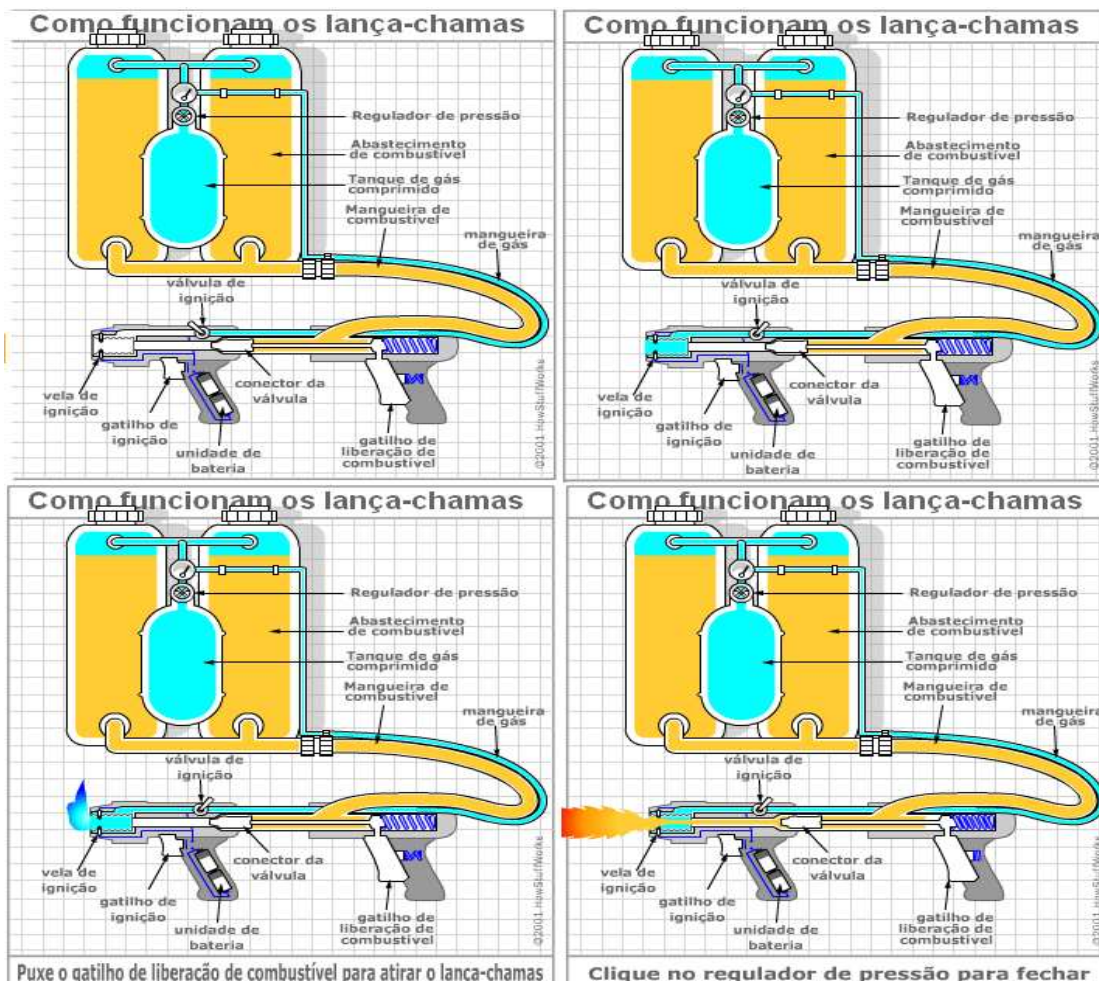


Figura 3.2 - Esquema de funcionamento de um lança-chamas portátil. (Retirado do site <http://ciencia.hsw.uol.com.br/lanca-chamas3.htm>)

O equipamento portátil contém três tanques cilíndricos. Os dois tanques de fora contêm líquido combustível à base de óleo. Os tanques têm tampa de rosca, assim podem ser recarregados facilmente. O tanque do meio contém um gás inflamável comprimido (como o butano). Esse tanque fornece gás através de um regulador de pressão a dois tubos conectados.

Um tubo vai até o sistema de ignição da arma e o outro tubo vai até os dois tanques de combustível laterais, permitindo ao gás comprimido entrar na parte vazia acima do líquido inflamável. O gás comprimido exerce uma grande pressão sobre o combustível, fazendo-o sair dos tanques, através de uma mangueira, para um reservatório na arma.

O alojamento da arma tem uma longa haste que se desloca através dele, com uma válvula de pino na ponta. Uma mola na parte de trás da arma força a haste para frente, pressionando o pino sobre a sede da válvula. Isso impede o combustível de sair através do bocal da arma quando o gatilho está solto. Quando o operador aperta o gatilho, ele puxa a haste (com o pino na ponta) para trás. Com a válvula aberta o combustível pressurizado pode

sair pelo bocal. Um lança-chamas como este pode lançar um jato de combustível a até 46 metros.

Ao sair pelo bocal o combustível passa pelo sistema de ignição. Através dos anos surgiu uma variedade de sistemas de ignição usados em lança-chamas. Um dos sistemas mais simples era uma bobina de fio de alta resistência. Quando a corrente elétrica passava através desses fios liberavam bastante calor, aquecendo o combustível até o ponto de combustão. A arma da Figura 3.2 tem um sistema ligeiramente mais elaborado.

Quando a válvula de ignição é aberta, gás inflamável comprimido do cilindro do meio passa através de uma longa mangueira até a arma. Então, ele é misturado com o ar e liberado, através de diversos furos pequenos, para a câmara no bocal de saída. A arma também tem duas velas de ignição colocadas na frente do bocal, que são acionadas pela carga de uma bateria portátil. Para preparar a arma, o operador abre a válvula e pressiona um gatilho que ativa a vela de ignição. Isso cria uma pequena chama na frente do bocal, que inflama o combustível, criando o jato de fogo.

CAPÍTULO 4 - FUNDAMENTOS DA TECNOLOGIA DE BASE – “COMBUSTÃO DE FILTRAÇÃO”

A tecnologia de base que está sendo empregada no desenvolvimento deste projeto de pesquisa é a “Combustão em Meios Porosos”, conhecida também como “Combustão de Filtração” (CF). Basicamente, CF é o processo de combustão ocorrendo nos interstícios de uma matriz porosa, que preenche completamente a câmara de combustão da caldeira, modificando significativamente os fenômenos de transferência de calor presentes no processo.

A CF caracteriza-se por um processo de recuperação de calor internamente auto-organizado, em que a combustão de uma mistura ar-combustível em um meio poroso difere significativamente da chama homogênea. Segundo Kennedy *et al.*, (1995), essa diferença pode ser atribuída a dois principais fatores: i) a superfície interna altamente desenvolvida do meio poroso, o que resulta em transferência de calor eficiente entre o gás e o sólido; e ii) a difusão efetiva da mistura de gases fluindo no meio poroso, favorecendo a transferência de calor. O calor da reação é armazenado quase que totalmente no meio poroso, e a parte da energia gerada no processo, que seria normalmente liberada pela exaustão com os gases de descarga, é recirculada na câmara de combustão (através do meio poroso). O meio poroso funciona como um armazenador de calor, recirculando-o para a mistura nova que está chegando à zona de reação. Ele armazena essa energia, da qual parte é absorvida por condução e radiação em regiões próximas a zona de reação, e parte é transportada por convecção através dos gases de combustão. Ao passar por um meio poroso, esses gases realizam uma intensa transferência de calor, segundo Hannamura *et al.*, (1993).

Contarin *et al.*, (2003) puderam constatar que a presença de uma fase sólida de alta condutividade e alta capacidade térmica possibilita a combustão porosa ocorrer nas vizinhanças dos trocadores de calor. A matriz porosa é capaz de reter o calor produzido pela reação e transferi-lo para o corpo frio (trocador de calor), favorecendo a extração de calor da reação. A transferência de calor intersticial promove um baixo grau de não-equilíbrio térmico entre as fases gás e sólida, permitindo que a onda térmica acople com a onda de combustão. Isso é caracterizado como o regime de baixa velocidade, como definido por Babkin (1993). Segundo Bingue *et al.*, (2002), a propagação da onda de combustão, em sentido contrário ou em sentido coincidente ao do escoamento da mistura ar-combustível, depende da razão de equivalência e da velocidade do escoamento da mistura empregada na reação. Isso define,

respectivamente, os regimes de operação subadiabático e superadiabático. Duas zonas de reação afastam-se uma da outra em direção às extremidades do reator, que propicia uma transferência de calor intensa nas proximidades dos trocadores de calor.

A CF em queimadores de caldeiras e aquecedores estende consideravelmente os limites de inflamabilidade para a região de misturas de conteúdo de calor ultra-baixo, com uma excelente estabilidade, o que é impossível em queimadores convencionais, como mostra Contarin *et al.*, (2001). De um modo geral, os queimadores pré-misturados utilizam controles complexos para restringir as emissões. Alternativamente, a CF favorece um projeto simples de reator que promove a formação típica de um perfil de temperatura trapezoidal centralizado no queimador, operando no regime superadiabático para misturas ultra-pobres. Essas propriedades resultam em uma baixa temperatura-característica de menos de 1600 K, que propicia emissões ultra-baixas de NO_x e CO. Barcellos *et al.*, (2003), operando com metano técnico, obtiveram valores de emissão inferiores a 1 ppm de NO_x e a 0,5 ppm de CO, quando aplicadas razões de equivalência inferiores a 0.3.

4.1 Tipos de Queimadores

Estudos sobre a combustão em meios porosos atribuem certa classificação quanto aos tipos de queimadores existentes para cada tipo de aplicação (Trimis *et al.*, 1997). Queimadores de combustão transiente e propagação da chama em meios porosos inertes, com transferência de calor em berço poroso com (Barcellos *et al.*, 2003; Contarin *et al.*, 2003) ou sem extração de calor (Hoffmann *et al.*, 1997), com superfície radiante, e também com conversão química catalítica em meios porosos, são alguns tipos comumente desenvolvidos para aplicações em diversos campos da engenharia.

Em princípio, todos os tipos de queimadores porosos têm um problema operacional em comum, que é a questão do sistema de ignição da mistura ar-combustível para iniciar o funcionamento. Várias têm sido as técnicas empregadas para desenvolver sistemas de ignição eficazes, entretanto, todos os sistemas desenvolvidos apresentam inconvenientes técnicos que são discutidos na sequência desta monografia.

4.1.1 Queimadores Radiantes

Muitas estruturas e materiais porosos foram testados no queimador poroso. Obviamente, propriedades de transferência de calor das estruturas porosas dependem da forma e estrutura das propriedades do material que está sendo utilizado. Trimis *et al.*, (1997) mencionam que a forma estrutural afeta a transferência de calor radiativa pela espessura óptica, a transferência de calor condutiva pelas superfícies de contato e/ou ligações do material sólido na estrutura porosa, e a convectiva, pela porosidade e na forma do escoamento resultante. O material sólido afeta a transferência de calor devido a suas propriedades materiais, como a condutividade e emissividade térmicas.

Com o intuito de poder operar um queimador de meio poroso inerte desde a ignição, estabilização e operação, em condições de regime permanente, é necessário que a estabilização da região da combustão seja feita em uma posição definida na matriz porosa. Trimis *et al.*, (1997) correlacionam o número de Peclet (Pe) com uma determinada posição do queimador para a estabilização da combustão, isso pode ser entendido como um indicador que relaciona a difusão fluidodinâmica em relação a difusão térmica de uma determinada região da superfície de um queimador poroso radiante, sugerindo que se a difusão de calor for extremamente intensa provocada pelo escoamento sobre a superfície do queimador poderá extrair calor da reação de forma a desestabilizar o processo de combustão que ocorre no seu interior. Ou seja, a estabilização da combustão depende de uma taxa específica de extração de energia para manter uma quantidade mínima armazenada no queimador, de forma a oferecer condições térmicas favoráveis à manutenção da frente de chama.

4.1.2 Queimadores Volumétricos

A Figura 4.1 mostra os principais componentes de um queimador volumétrico típico. O queimador é composto por trocadores de calor, os quais são inseridos no meio poroso para extração de calor, constituindo assim um equipamento bastante compacto. O dimensionamento deste tipo de queimador está caracterizado por poder atuar em uma ampla faixa de potência devido a sua estabilidade operacional a baixas razões de equivalência.

Camadas de isolamento de fibra cerâmica envolvem a região onde ocorre a combustão, de modo a evitar perdas de calor através das paredes e, conseqüentemente, formação de CO.

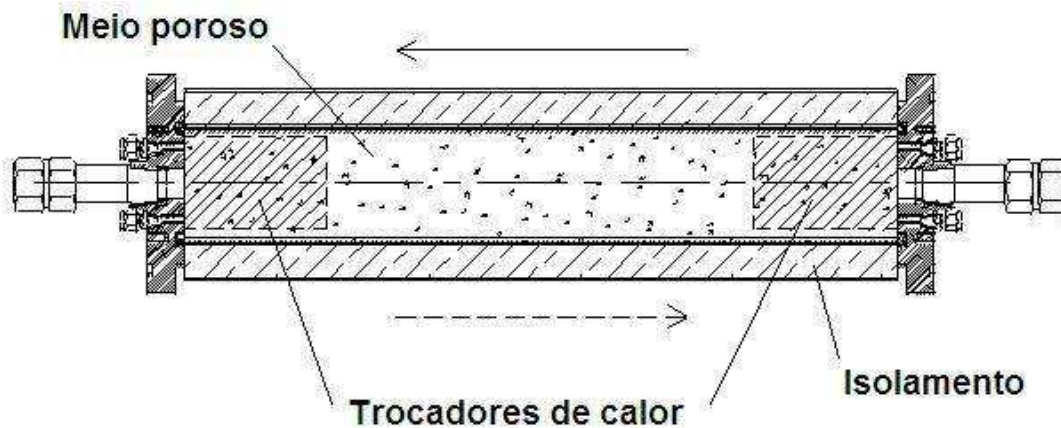


Figura 4.1 - Desenho esquemático de um queimador volumétrico típico. (Trimis *et al.*, 1997)

4.2 Sistemas de Ignição Desenvolvidos para Combustão de Filtração

Em geral, os projetos de reatores para pesquisa na área de CF utilizam três classes de sistemas de ignição da mistura ar-combustível, que se diferem pelos seguintes detalhes de projeto: i) introdução de uma vela de centelha para ignição diretamente na matriz porosa; ii) envolvimento da matriz porosa com um fio resistivo para aquecimento até atingir a temperatura de combustão espontânea; iii) instalação de um dispositivo de chama-piloto próximo a matriz porosa. Cada uma dessas metodologias de projeto de sistemas de ignição apresenta vantagens e desvantagens em termos operacionais.

O sistema de ignição por centelhamento pode ser considerado como sendo o de menor custo, entretanto envolve um maior conjunto de componentes elétricos (Hoffmann *et al.*, 1997). Na maioria dos casos os eletrodos são danificados ao longo do uso com a própria temperatura da câmara porosa de combustão na qual estão inseridos. Deve ser ressaltada a necessidade de ser especificado no projeto do queimador um espaço vazio (vão livre) na matriz porosa, para que a ignição se processe. Conseqüentemente, a propagação da onda de combustão ao longo do berço poroso tende a ficar prejudicada.

Aquecer o berço poroso através de uma resistência elétrica, envolvendo todo o seu comprimento, tem sido predominantemente o procedimento mais utilizado pelos pesquisadores no estudo dos reatores porosos. O fato de poder aquecer a câmara de

combustão externamente propicia condições para manter a homogeneidade de temperatura da matriz porosa, permitindo a plena liberdade de propagação da onda de combustão, ideal para os reatores volumétricos de escoamento recíproco (Kennedy *et al.*, 1995).

O sistema de ignição que depende de uma chama piloto para iniciar o processo de combustão tem sido pouco especificado para projetos de queimadores porosos (Hoffmann *et al.*, 1997; Kennedy *et al.*, 1999). A vantagem da presença da chama-piloto dentro da câmara porosa de um queimador volumétrico é a fácil ocorrência da ignição da mistura ar-combustível, desde que a geometria e posicionamento da chama estejam adequados em relação à direção do escoamento dos gases. Por outro lado, este tipo de sistema de ignição traz como desvantagem o consumo contínuo de combustível, que gera um incremento das emissões, e ainda dificulta a implementação de um sistema recíproco de escoamento de mistura ar-combustível, quanto ao aspecto de segurança.

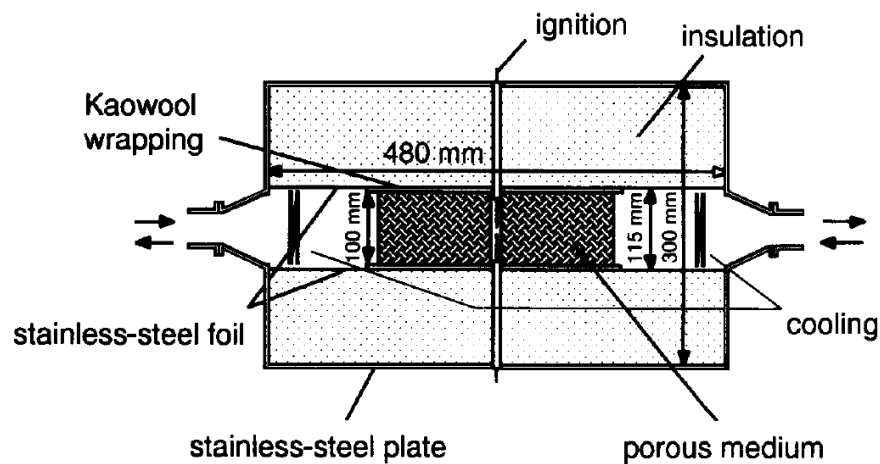


Figura 4.2 - Desenho esquemático de um ignitor próximo do aquecimento. (Hoffmann *et al.*, 1997)

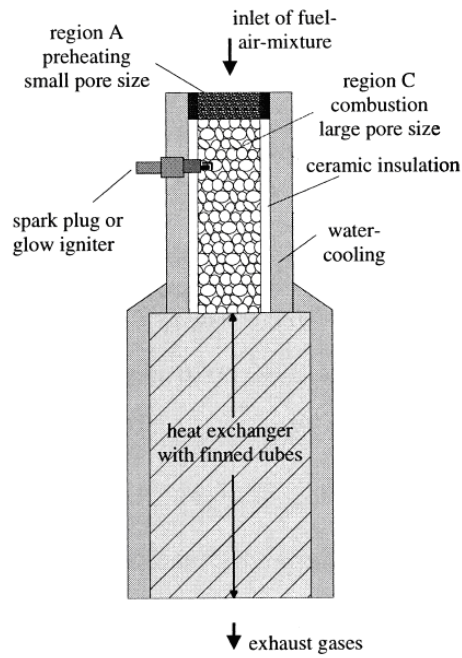


Figura 4.3 - Sistema de ignição inserido no meio poroso. (Brenner *et al.*, 2002)

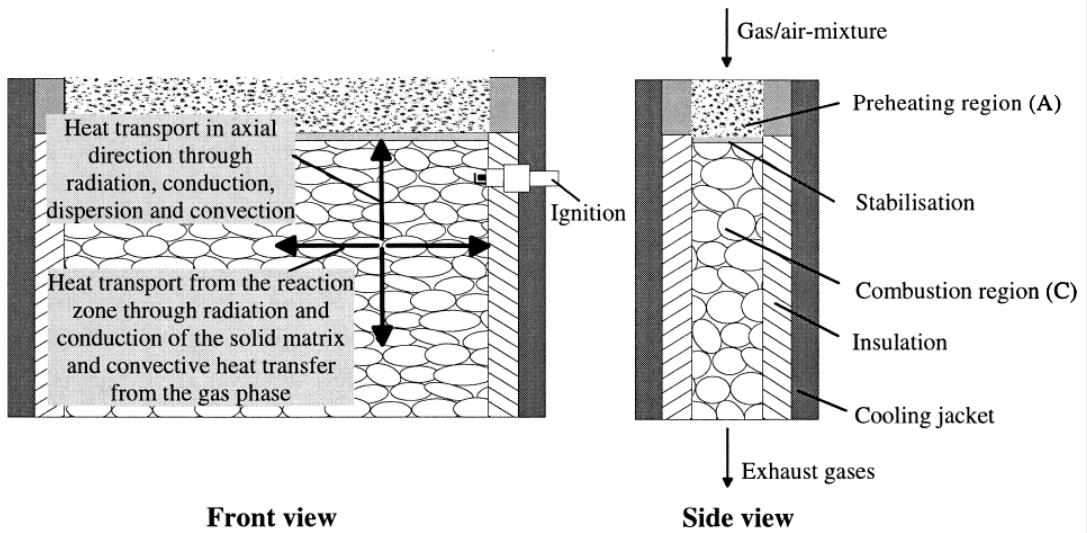


Figura 4.4 - Detalhe do sistema de ignição inserido no meio poroso. (Brenner *et al.*, 2002)

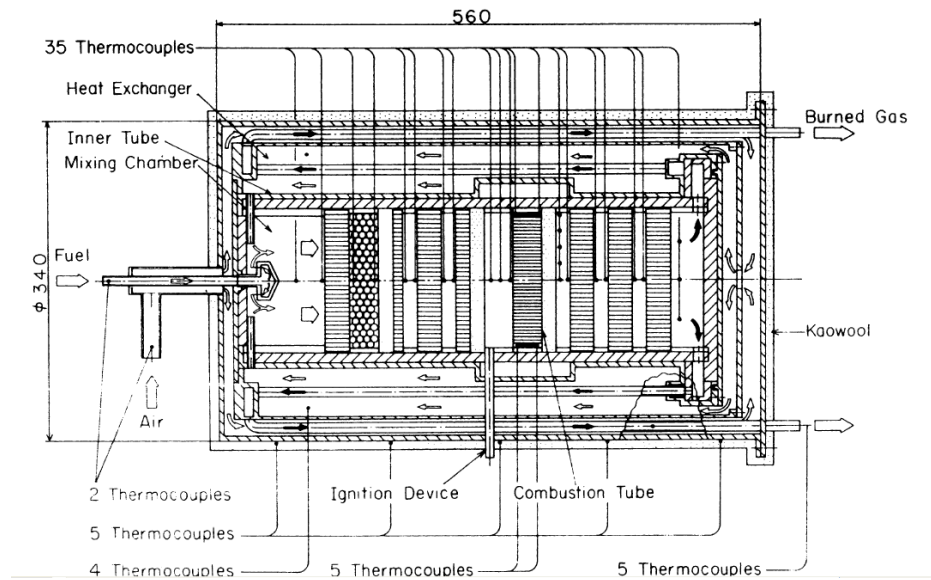


Figura 4.5 - Sistema de ignição por chama piloto. (Harris *et al.*, 2008)

4.3 Caldeira instalada no LACER



Figura 4.6 - Foto da Caldeira Superadiabática instalada no LACER.

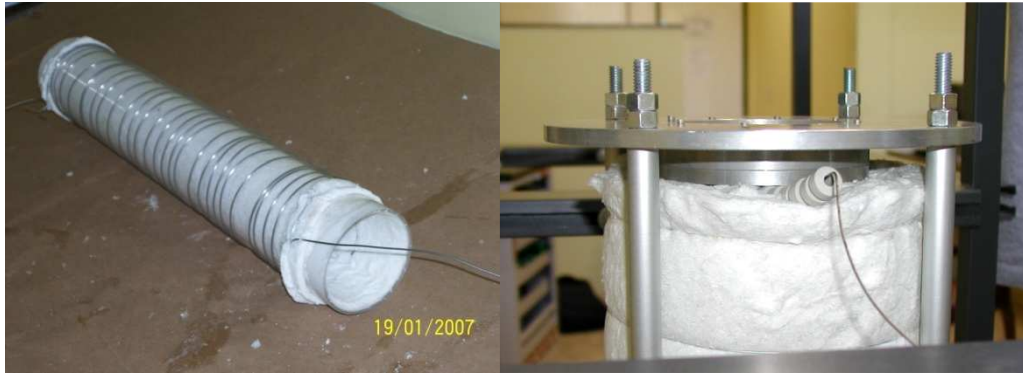


Figura 4.7 - Fotos do sistema de aquecimento utilizado na caldeira superadiabática instalada. (LACER)

CAPÍTULO 5 - METODOLOGIA

5.1 Aspectos de Projeto

Objetivamente, este trabalho trata do desenvolvimento de um sistema de ignição, caracterizado pelo ineditismo, principalmente por ser uma tecnologia não difundida nos meios industriais e acadêmico, sem disponibilidade de uma literatura de referência apropriada.

Sendo esse um projeto original, um estudo investigativo foi então realizado, tanto no âmbito teórico como no experimental. Com base nesta premissa, uma metodologia foi, então, estabelecida para discriminação e sequenciamento das atividades, que englobam a montagem do sistema e pré-instalação no equipamento (Aquecedor).

Inicialmente foi feita a revisão bibliográfica a respeito da Combustão de Filtração e dos Sistemas de Ignição atualmente existentes aplicados ao meio poroso. Paralelamente, aconteceram a preparação e a instalação do protótipo com os instrumentos de medição, o sistema de alimentação e o sistema de ignição.

Dentre as atividades que compõem esse estudo, são selecionadas as etapas prioritárias que melhor contribuem para o entendimento dos fenômenos presentes no processo.

Entretanto, precedente a essas análises do sistema em desenvolvimento, foi verificado alguns aspectos operacionais e de projeto importantes para nortear a condução do estudo, evidenciando o quão promissora é a tecnologia proposta. Denotam-se assim algumas vantagens do sistema de ignição desenvolvido comparativamente aos sistemas convencionais, tais como:

i) Sendo o sistema de ignição composto de uma pré-câmara instalada fora da estrutura interna do reator, não há qualquer interferência da presença desse sistema sobre o processo de funcionamento da caldeira;

ii) Não há necessidade de espaço livre no corpo poroso do queimador para manter a combustão que fora induzida pelo sistema de ignição. Com isso é evitada a mudança brusca de porosidade que normalmente interfere no translado da zona de reação ao longo do berço poroso do queimador;

iii) O sistema permite variar a razão de equivalência e a velocidade da mistura ar-combustível, após estabilização do processo de aquecimento por combustão através do ignitor lança-chamas;

iv) Há certa independência de projeto quanto ao dimensionamento do sistema de ignição em relação à caldeira, influenciando apenas o tempo de aquecimento;

v) Esse sistema de ignição não impõe limitações de projeto do queimador da caldeira, quanto à especificação (propriedades físico-químicas e geométricas) do meio poroso;

vi) O projeto do sistema tem como características: a simplicidade e a compacidade, o que resulta em baixo custo de fabricação e manutenção;

vii) Há boa versatilidade do sistema de ignição, quanto às alternativas para ignitar a mistura ar-combustível na pré-câmara, podendo ser utilizadas diferentes técnicas, tais como: ponto quente, vela de automóvel, chama piloto, cristal de quartzo, dentre outras;

viii) O sistema desenvolvido opera com baixa temperatura dos componentes de ignição, propiciando segurança operacional e durabilidade;

O sistema de ignição lança-chamas desenvolvido para o aquecedor superadiabático tem o princípio de funcionamento inovador, pelo fato de apresentar características bastante diferenciadas em relação aos equipamentos convencionais. O equipamento em desenvolvimento opera com a frente de chama sendo arrastada pelo escoamento da mistura ar-combustível, ao invés da frente ser impulsionada pelo combustível, como ocorre nos lança-chamas conhecidos. A principal vantagem do sistema proposto é a combustão controlada com misturas levemente pobres, processando-se no meio poroso com baixa emissão de poluente. Ao contrário, os sistemas convencionais operam concentrações elevadas de combustível, o que gera elevados índices de poluente, em especial de particulado.

Alguns benefícios tecnológicos para a Caldeira/Aquecedor Superadiabáticos instalados no Laboratório, quanto ao processo de aquecimento do meio poroso para iniciar seu funcionamento, podendo ser citados:

i) a maior durabilidade do sistema de ignição por estar fora da zona de reação, o que evita a desmontagem do equipamento para substituição do fio resistivo;

ii) O tempo de aquecimento do berço poroso foi reduzido em aproximadamente 1:12 (um doze avos) do tempo atualmente despendido com o sistema de ignição com fio resistivo, eliminando o custo de energia elétrica e reduzindo o risco de avarias para os componentes da caldeira;

iii) A frequência de manutenção corretiva deverá ser significativamente diminuída, praticamente dispensando a desmontagem de praxe;

iv) O sistema de ignição do aquecedor é robusto e poderá ser empregado também em caldeiras para uso no meio rural, porque o protótipo desenvolvido elimina a necessidade de um equipamento supridor de potência (Variac) que tende a danificar-se com facilidade e que depende de uma fonte estável de suprimento de energia elétrica.

Os parâmetros observados a partir de experimentos em laboratório, assessorados por um estudo de caracterização do escoamento dos gases no interior do protótipo lança-chamas, contribuíram para o entendimento do processo de propagação da onda de combustão, ao longo do tubo de quartzo. Certos parâmetros de projeto foram objeto de análise para especificação das dimensões do protótipo, tais como:

i) A geometria da pré-câmara de ignição é um fator que influencia diretamente na propagação da onda de combustão, devendo ser uniforme, sem quinas contudentes ao longo da superfície de escoamento dentro da pré-câmara e do tubo-lançador, como mostra a Figura 5.1.

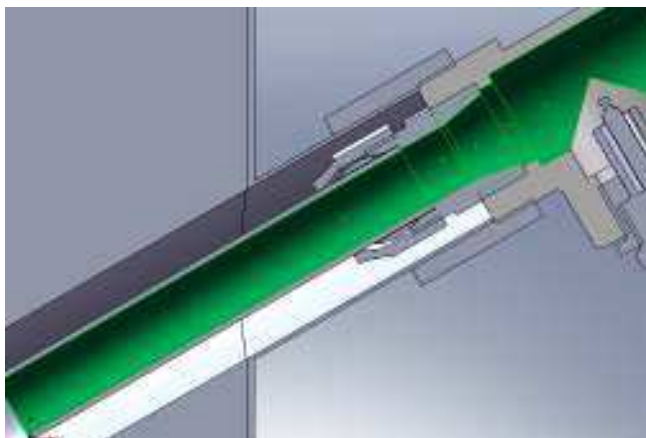


Figura 5.1 - Geometria interna do escoamento. (Destaque em verde)

ii) O tempo para estabilização da chama no meio poroso após lançamento da frente de chama pela pré-câmara, segundo valores de razão de equivalência e de velocidade da mistura ar-combustível, sofre influência dos fenômenos de transmissão de calor;

iii) A especificação do projeto construtivo, considerando o material utilizado, as velocidades de escoamento, as distâncias entre o ponto de centelhamento e o meio poroso, são os elementos fundamentais para determinação da relação diâmetro/comprimento do tubo lançador;

Objetivamente, o projeto pode ser resumido ao interesse de investigar os fenômenos presentes no processo para determinar as proporções ideais do sistema de ignição em

desenvolvimento, constituído de pré-câmara e tubo-lançador de chama, tomando como referência a distância entre a pré-câmara e o meio poroso do queimador da caldeira, e compatibilizando o suprimento de calor do sistema de ignição com as dimensões da caldeira.

A priori, a dúvida residia na definição quanto à melhor relação diâmetro/comprimento do tubo-lançador e, também, quanto aos efeitos da redução de área desse tubo em relação às dimensões da pré-câmara. Com base nas distâncias impostas pelas dimensões da caldeira, foram selecionados 3 (três) diâmetros de tubo de quartzo para o estudo teórico-experimental do sistema de ignição em desenvolvimento. Efetivamente, os diâmetros selecionados para realização dos ensaios foram 12.7 mm (1/2”), 15.8 mm (5/8”) e 19.05 mm (3/4”), conforme mostra Figura 5.2.



Figura 5.2 - Tubos de quartzo selecionados para estudo.

5.2 Simulação do Processo no Sistema de Ignição

Neste trabalho especificamente, o principal objetivo foi obter uma solução numérica para caracterização do escoamento no interior da câmara do sistema de ignição lança-chamas.

A análise de simulação do escoamento no sistema de ignição é importante para entendimento do processo.

Para realizar este estudo, as seguintes etapas foram executadas:

- Geração de malha;
- Determinação de uma solução do campo de escoamento;

- Verificação da distância adimensional em relação à parede (y^+), o que caracteriza a configuração do escoamento indicando a necessidade de maior ou menor refinamento da malha;
- Validação visual da estrutura do fluxo.

Os domínios do fluxo foram gerados em um software CAE, e exportados no formato STL. Os arquivos puderam então ser lidos pelo software de fonte livre CAE SALOMÉ 3.2.6, que foi usado para gerar a malha para a simulação. A geração de malha Foi realizada aplicando o algoritmo NETGEN (Schoberl, 1997), que é fornecido pelo software SALOMÉ 3.2.6. Este algoritmo produz malhas tetraédricas plenas, automática e refinamento sobre superfícies curvas.

Nesta fase, a principal intenção foi obter malhas semelhantes ao que foi realizado experimentalmente. Os resultados da distância adimensional da parede (y^+) indicaram um bom nível de refinamento da malha perto da parede. Uma vez pronta, a malha foi exportada no arquivo de formato universal I-Deas (UNV). Este arquivo de malha pode ser importado diretamente no caso ANSYS CFX.

Seguindo o procedimento proposto, a malha foi lida pelo software, e as condições de contorno apropriadas foram aplicadas. Nesta etapa de estudo, somente as condições de entrada foram necessárias para obter o fluxo de solução, as velocidades para cada diâmetro de tubo são apresentadas na Tabela 5.1. Deve ser ressaltado que os valores mostrados nessa tabela foram aqueles empregados na iniciação do trabalho experimental, os quais foram obtidos a partir de uma expectativa de uma mistura ar-combustível estequiométrica seguindo uma proporção próxima ao que ocorre no queimador poroso. Evidentemente, com a vivência no trabalho experimental esses valores são alterados conforme será comentado nas seções subseqüentes desta monografia.

Tabela 5.1 – Condições de fluxo de entrada

	Tubo 1/2"	Tubo 5/8"	Tubo 3/4"
Velocidade Normal (m/s)	4.041	3.575	2.527

Estes valores foram os que geraram a maior estabilidade das frentes de chama nos experimentos. Uma vez que todas as condições-limite foram colocadas no software, as simulações foram realizadas. Os parâmetros de referência para simulação foram: estado estacionário; Regime de alta resolução numérica; Valor máximo da média RMS no domínio de todas as variáveis foram 1.10^{-5} , e modelo de turbulência "k- ϵ ".

5.2.1 Resultados e Comentários

A simulação alcançou a convergência em cerca de 500 passos. A racionalização para cada caso (tubos de 1/2", 5/8" e 3/4") foram plotadas nas Figuras 5.3, 5.4 e 5.5. A aceleração do fluxo pode ser vista e, também, as velocidades máximas.

Para confirmar que as malhas foram apropriadas à simulação, o y^+ na parede foi avaliado, e os resultados são mostrados na Figura 5.6, 5.7 e 5.8.

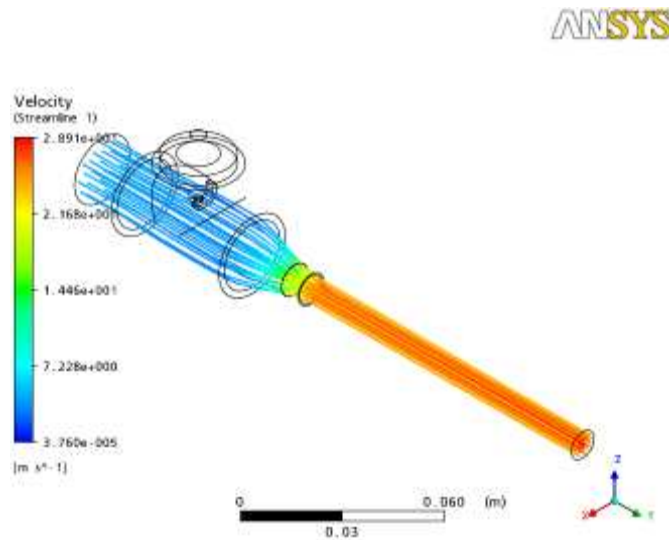


Figura 5.3 - Linhas de corrente do tubo de 1/2"

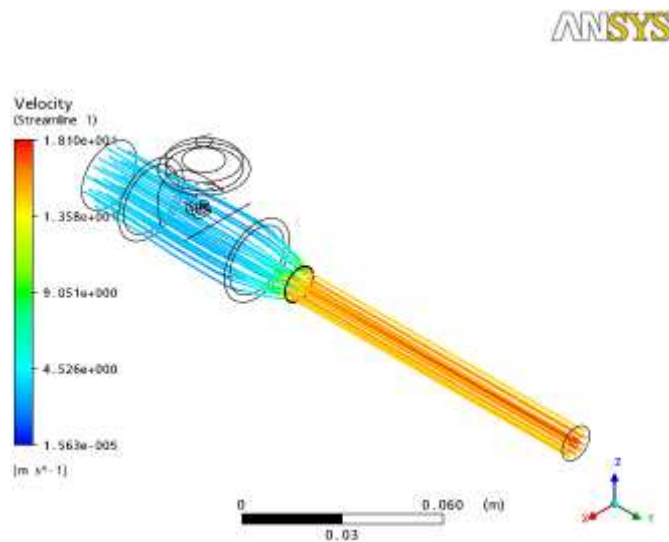


Figura 5.4 - Linhas de corrente do tubo de 5/8"

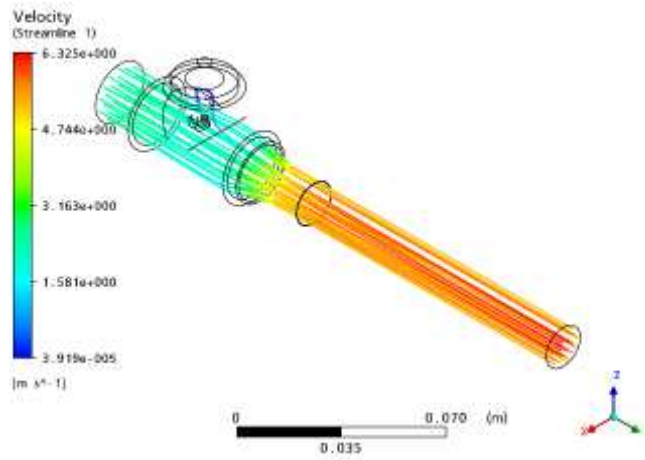


Figura 5.5 - Linhas de corrente do tubo de 3/4"

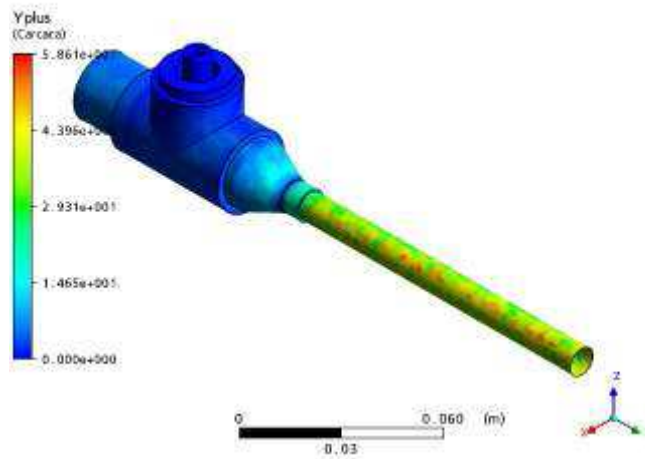


Figura 5.6 - y+ nas paredes do tubo de 1/2"

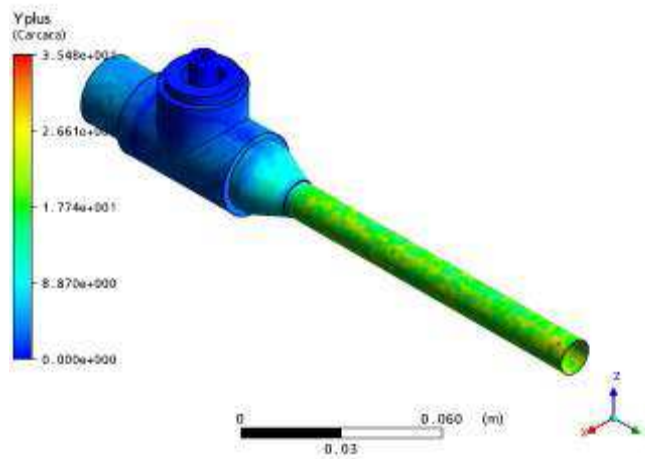


Figura 5.7 - y+ nas paredes do tubo de 5/8"

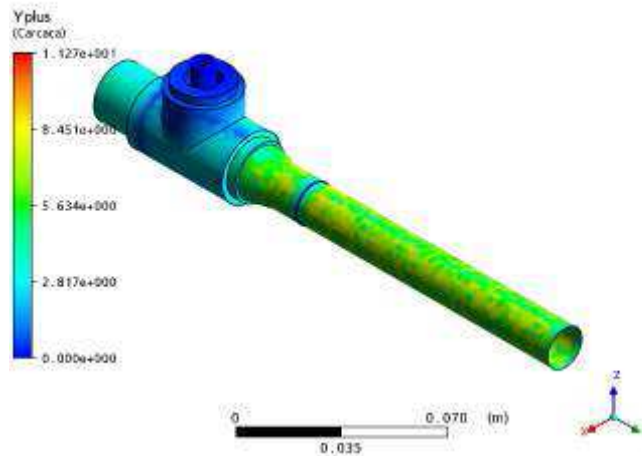


Figura 5.8 - y^+ nas paredes do tubo de 3/4"

Todos os resultados foram abaixo ou em torno de 60, o que é um bom resultado para o modelo de turbulência selecionado (RANS $k-\epsilon$), e indica que as camadas-limite desenvolvidas estão bem representadas. Uma vez que os resultados indicam que a simulação realizada foi bem estabelecida, a característica do fluxo é apresentada nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11, que é um plano de corte do domínio, incluindo a ignição por centelha e mostrando o campo de velocidade.

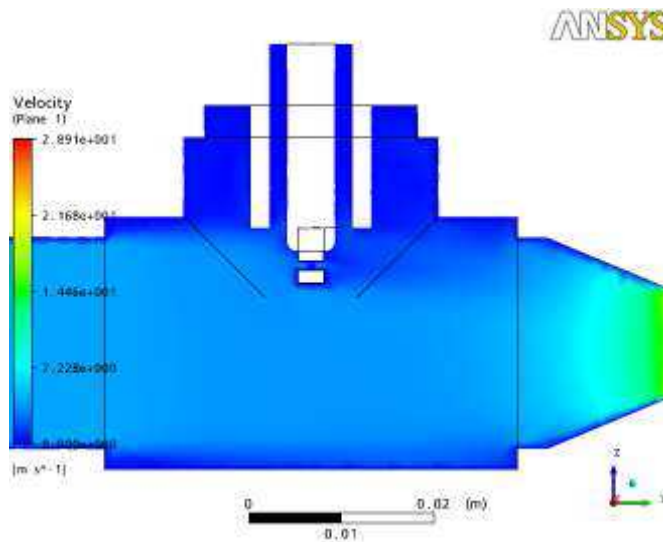


Figura 5.9 - Campo de velocidade do tubo de 1/2"

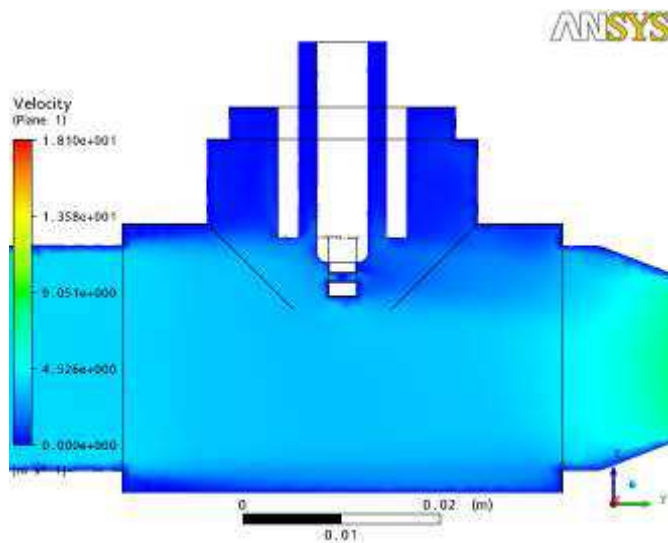


Figura 5.10 - Campo de velocidade do tubo de 5/8"

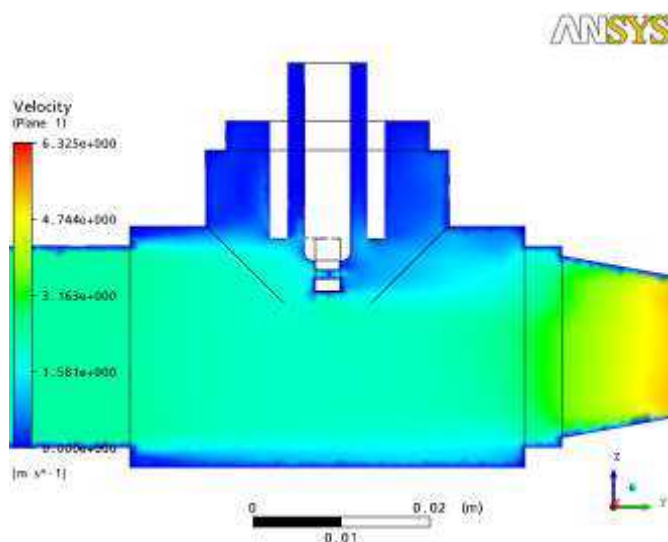


Figura 5.11 - Campo de velocidade do tubo de 3/4"

Como mostrado anteriormente, o fluxo é viável para as condições físicas impostas. Deve ser notada a formação de uma corrente a jusante na região de ignição da centelha. Regiões de pequena recirculação de escoamento também existem nos cantos. É importante notar que o fluxo está estagnado na região da centelha (azul), na qual a área de menor estagnação ocorre para o caso do tubo de 3/4".

5.3 Aparato Experimental

O estudo experimental do sistema de ignição lança-chamas desenvolvido para o aquecedor de queimador poroso foi realizado a partir de alguns conceitos físicos aplicados, consubstanciado pela análise teórica a partir da simulação numérica de caracterização do escoamento dos gases no interior do corpo da pré-câmara e do tubo-lançador, que constituem esse sistema de ignição.

No dimensionamento dos componentes, teve-se o cuidado de se verificar as geometrias dos bocais formados pelas conexões dos componentes do sistema, projetando canais com menor incidência de ressaltos que pudessem oferecer resistência ao escoamento. O mesmo cuidado foi tomado quanto às relações de diâmetro na transição entre as seções de escoamento, no sentido de favorecer a projeção da frente de chama ao longo do corpo do sistema de ignição.

Objetivando entender os fenômenos presentes no funcionamento do sistema de ignição, alguns critérios de desenvolvimento do estudo experimental foram estabelecidos. O planejamento do estudo do sistema levou à análise experimental em duas etapas: i) o estudo do sistema de ignição propriamente em bancada específica para conhecer o processo de propagação da frente de chama; e ii) o estudo do funcionamento do sistema de ignição instalado no aquecedor. Na primeira etapa objetivou-se visualizar o escoamento para avaliar a velocidade de deslocamento da frente de chama ao longo do tubo-lançador, e também medir o tempo necessário para estabilizar o processo, quando efetivamente inicia o aquecimento da matriz porosa da caldeira.

5.3.1 Bancada de Pesquisa com Protótipo do Sistema de Ignição Lança-Chamas

Como mencionando no item anterior, a bancada de pesquisa desenvolvida para estudo do sistema de ignição foi construída em etapas. A primeira foi a construção do protótipo do sistema de ignição e instalação em uma seção de tubo com diâmetro semelhante ao do queimador do aquecedor, onde foram depositadas as esferas cerâmicas de alumina com pouco mais de 5 mm de diâmetro, como é feito na montagem do aquecedor.

Com esse protótipo, como mostra a Figura 5.12, controla-se as vazões de ar e combustível e mede-se o tempo de estabilização da frente no meio poroso. Além de rotâmetros adequados às faixas de vazões dos reagentes, foram utilizados termopares para

medição de temperaturas no interior da matriz porosa do queimador, na parede do tubo do queimador e nos componentes do sistema de ignição, para verificar as possibilidades de avarias ocasionadas pela temperatura da zona de reação.



Figura 5.12 - Bancada de teste da primeira fase do projeto

A seção do protótipo com o tubo de quartzo exposto permite visualizar a frente de chama propagando-se dentro do tubo-lançador, como também permite perceber o momento que a frente de chama se instala definitivamente no meio poroso do queimador da caldeira.

Basicamente, o objetivo principal do estudo experimental com essa bancada de pesquisa foi verificar a influência do diâmetro do tubo-lançador de quartzo sobre o processo, mediante um comprimento especificado (ver item 5.1), o qual é limitado pela montagem do protótipo do sistema de ignição no corpo da caldeira. Efetivamente, o tubo de diâmetro selecionado para ensaio (3/4") pôde ser facilmente adaptado ao corpo da pré-câmara, onde está instalada a vela de ignição, como mostra a Figura 5.13.

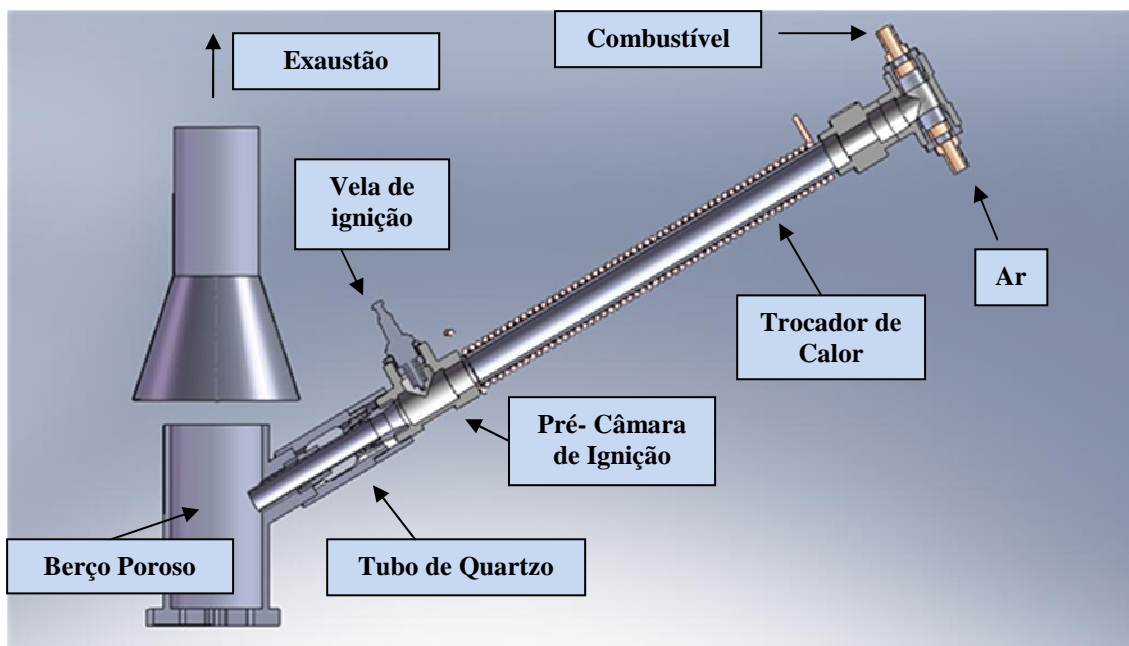


Figura 5.13 - Detalhamento em corte da pré-montagem na primeira etapa do projeto.

5.3.2 Aquecedor de Queimador Poroso com Sistema de Ignição Lança-Chamas

O objetivo final do projeto é a aplicação do protótipo do Sistema de Ignição Lança-Chamas no Aquecedor, como mostra a Figura 5.14. Todas as dimensões de instalação do protótipo no aquecedor foram respeitadas para desenvolvimento da bancada de pesquisa.

Como pode ser observado o sistema de ignição é instalado no corpo do aquecedor com uma angulação de forma a evitar que as esferas que constituem o queimador poroso não tendam a se depositar dentro do tubo-lançador de chamas do sistema de ignição. Observa-se também que o protótipo do sistema de ignição está instalado em posição aproximadamente intermediária do comprimento do queimador da caldeira, para manter certa distância em relação aos trocadores de calor da caldeira.

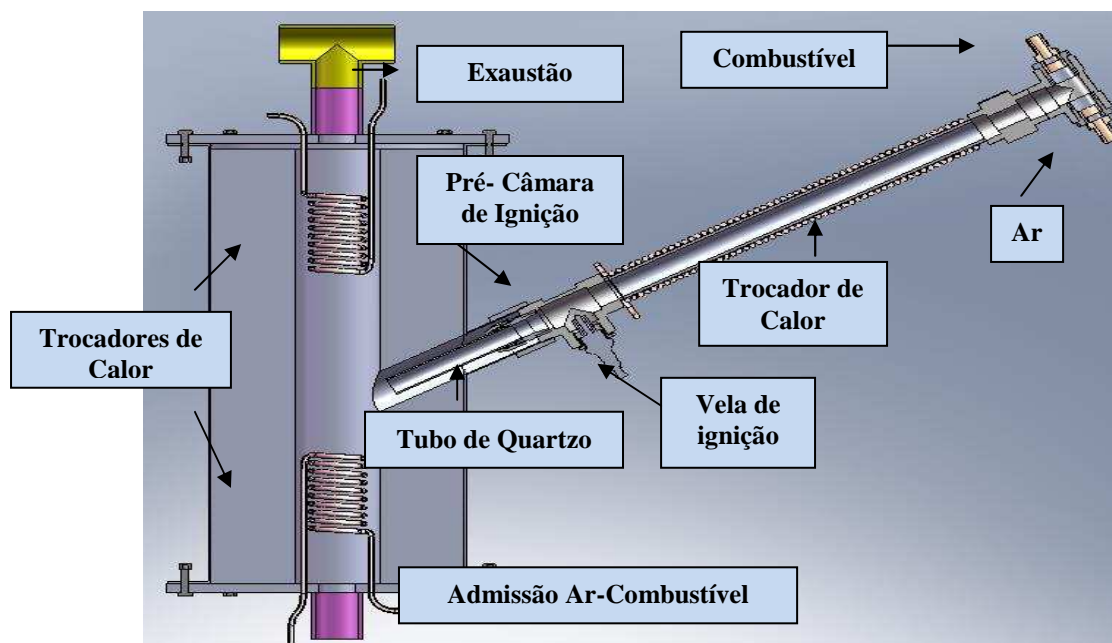


Figura 5.14 - Detalhamento em corte da pré-montagem na segunda etapa do projeto

O protótipo do aquecedor em estudo, construído em escala de laboratório, basicamente consiste de um queimador poroso com trocadores de calor inseridos no berço poroso. Por esse berço, atravessa a mistura ar-combustível ao longo de todo seu comprimento.

5.3.3 Aspectos Funcionais e Operação

Visando o pleno funcionamento do Aquecedor Poroso com Sistema de Ignição Lança-Chamas foi preciso garantir o fornecimento de Ar, Água e Combustível. Detalhes desses Sistemas e do Sistema Elétrico serão abordados nas Figuras 5.15, 5.16, 5.17 e 5.18.

Para garantir segurança na realização dos testes foi preciso, inicialmente, liberar o sistema circulação de ar, em seguida, o sistema de circulação de água e, em seguida, o sistema de circulação de combustível. Assim, quando esses três sistemas estão operando de forma controlada, pode-se iniciar o sistema elétrico.

A Figura 5.15 referente ao sistema de circulação de ar retrata o diagrama esquemático do caminho percorrido pelo ar até a entrada no sistema de ignição ou entrada no corpo do aquecedor. Inicialmente esse ar é fornecido por um compressor passando por reguladores de pressão, e posteriormente, segue até os rotômetros para serem controlados conforme vazão requerida pelo sistema. Então, existe uma bifurcação que induz o ar a seguir ou para o sistema

de ignição (onde é realizada a mistura com o combustível) ou, para o queimador poroso para depois ser lançado na exaustão.

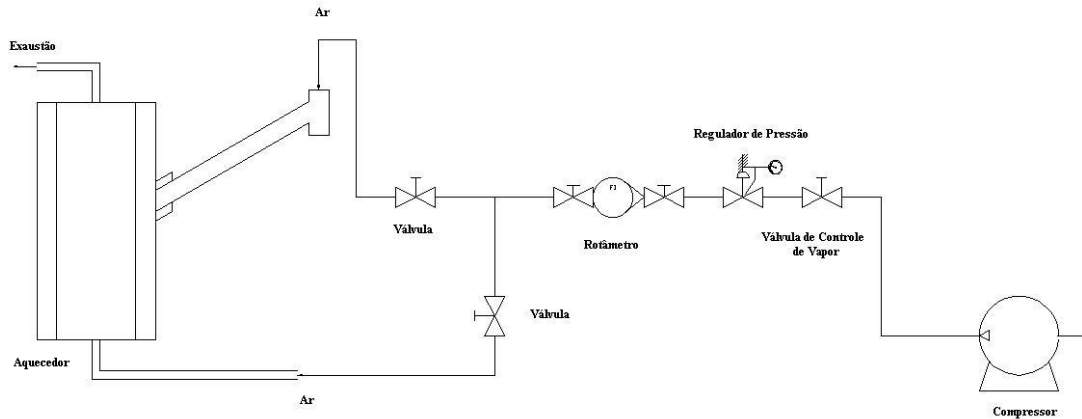


Figura 5.15 - Sistema de Circulação de Ar

Já para o sistema de circulação de água que é fornecido pela rede pública, pode-se verificar através da Figura 5.16 que a água é responsável por promover o resfriamento da pré-câmara, e, também, pelo pleno funcionamento do sistema de ignição como um todo, pois controla a tendência da chama de seguir em direção oposta ao berço poroso. Por essa razão o tubo de alimentação de ar-combustível para a pré-câmara é envolvido por um tubo de cobre (trocador de calor) para seu esfriamento e bloqueio de propagação da frente em direção ao ponto de junção das redes de ar e de combustível, a montante da pré-câmara. Então, após a captação no sistema ela pode seguir diretamente para circulação no trocador de calor do sistema de ignição, ou pode ainda, atravessar a válvula de controle de processo e posteriormente os rotômetros para finalmente, adentrar nos trocadores inseridos no corpo do aquecedor.

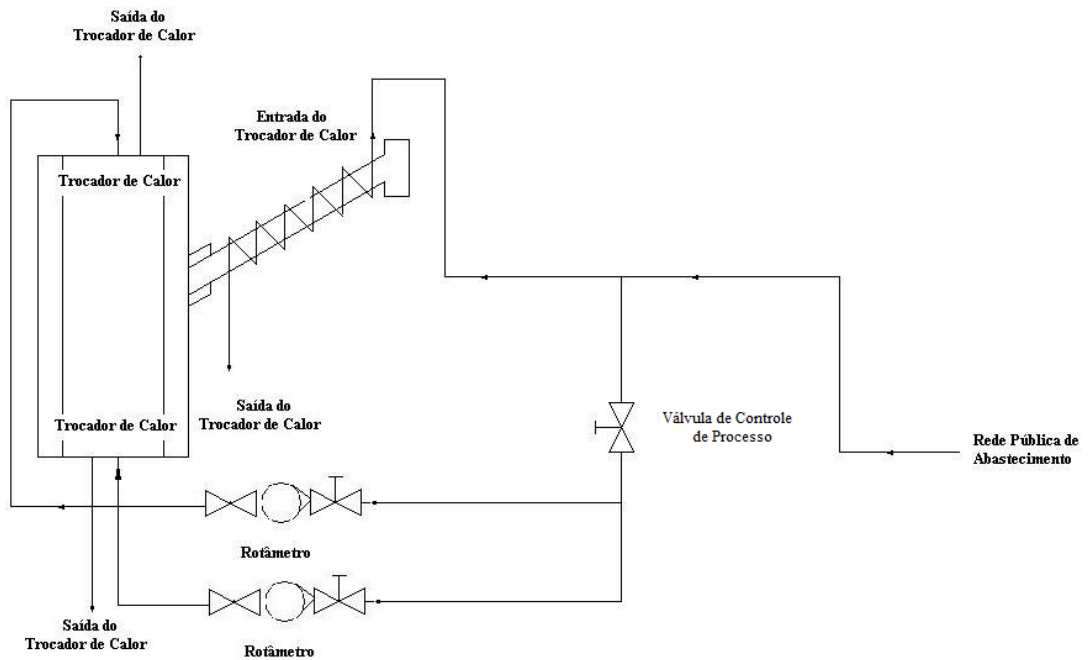


Figura 5.16 - Sistema de Circulação de Água

O sistema de circulação de combustível, apresentado na Figura 5.17 é suprido por um cilindro composto por válvulas de bloqueio e reguladores de alta e baixa pressão. Saindo do cilindro, o combustível segue para os rotômetros e atravessa a válvula de controle de processo, essa válvula regula água e combustível. Por fim, depois de regulado, o combustível pode seguir para o sistema de ignição ou para o corpo do aquecedor.

Depois que todo esse conjunto composto pelos sistemas citados anteriormente (ar, água e combustível) estão operando de forma controlada, pode-se iniciar o processo de ignição.

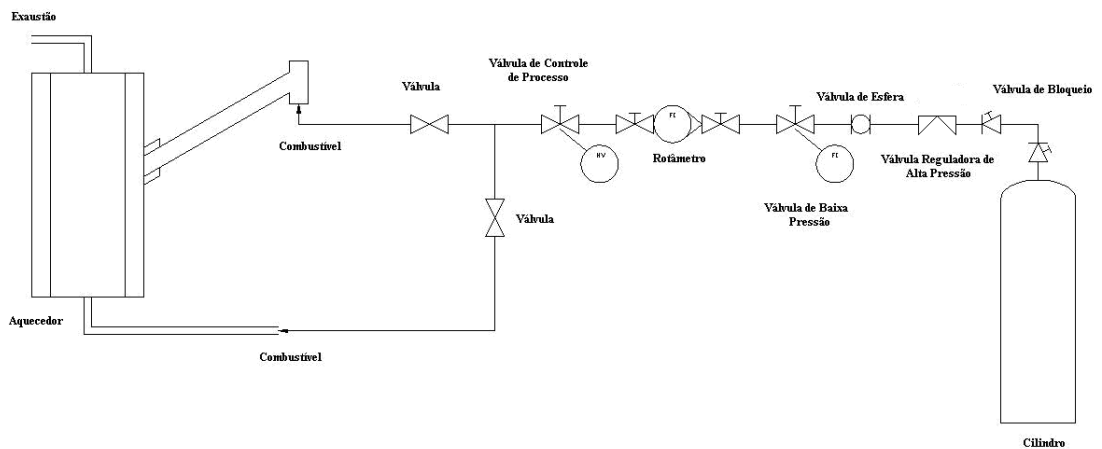


Figura 5.17 - Sistema de Circulação de Combustível

O sistema de ignição apresentado na Figura 5.18 é um circuito composto de uma bateria devidamente aterrada (-) e ligada a uma bobina (+). Esta possui ligações tanto com a vela de ignição localizada na pré-câmara (circuito secundário de alta tensão) quanto com o condensador (circuito primário de baixa tensão). E finalmente, este se liga ao platinado que se encontra aterrado, fazendo o trabalho de interruptor, fechando e abrindo o circuito primário.

Foi observado durante os ensaios do sistema de ignição em desenvolvimento que a frente pode se propagar em sentido contrário ao escoamento da mistura ar-combustível fresca que entra no tubo de alimentação, ou ser arrastada pelo escoamento em direção ao berço poroso do aquecedor. Basicamente, o fator determinante é a razão de equivalência, isto é, quando a mistura se torna pobre não tem energia suficiente para caminhar contrariamente ao escoamento.

Por essa razão, foi necessário desenvolver uma válvula corta-chama, para ser instalada na entrada do tubo de alimentação da pré-câmara, a fim de impedir que a frente se propague e avance para o ponto de alimentação de combustível.

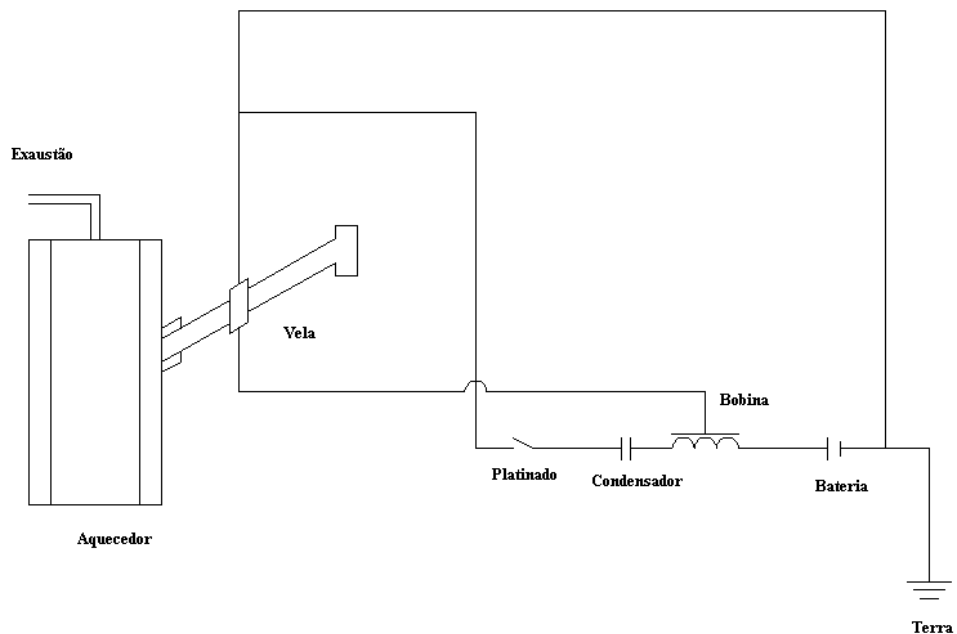


Figura 5.18 - Sistema Elétrico de Ignição

5.4 Instrumentos

5.4.1 Termopares

A temperatura da câmara de combustão é medida através de 1 termopar tipo “S”, que consiste de um fio de liga Platina/Platina-Ródio 10% de 0.08 mm de diâmetro unidos por solda. A junta soldada gera um potencial elétrico, o qual é função da temperatura da interface (junção) conhecida. Um tubo cerâmico de 8 mm de diâmetro possui 8 furos axiais para alojar os termopares. Esse tubo atravessa o reator de ponta a ponta. Os comprimentos das porções de Platina e de Platina/Ródio foram arranjados de forma que a junção ficou em posição próxima à zona de reação. O fio do termopar (TP) na parte de baixo do reator está conectado a uma linha comum (pólo negativo). Na parte de cima do queimador, o fio do termopar está conectado ao pólo positivo.

A temperatura de exaustão dos gases (admissão da mistura, ocasionalmente) é medida por um termopar do tipo “K” (liga Cromel-Alumel), contendo uma ponta fina (diâmetro de 0.02”) que permite uma resposta mais rápida. O tempo de resposta desses TP, nesse caso, é um assunto de importância devido à natureza transiente do reator (a temperatura muda periodicamente com o tempo devido à reversão do escoamento). O TP é colocado na tubulação de saída a uma distância relativamente curta da extremidade do reator por meio de uma conexão rosqueada e vedada com uma anilha de teflon.

A medição da temperatura da água tem que ser com boa precisão, já que diferenças de temperaturas são relativamente pequenas. A água, com temperatura de entrada aproximadamente igual a 25°C, é aquecida até atingir cerca de 55°C, dependendo das condições de operação (razão de equivalência e velocidade da mistura ar-combustível) adotadas, sendo medida com termopares tipo “J” (liga Ferro-Constantan).

5.4.2 Rotâmetros

A vazão de água é controlada por meio de dois rotâmetros, marca *Dwyer* – modelo MMA-37, o que fornece uma escala total de $3,33 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$. Os rotâmetros estão diretamente ligados à linha de suprimento de água.

A admissão do sistema consiste de uma mistura de combustível e ar, onde o combustível utilizado foi o gás natural (GN). Devido ao interesse em estudar o desempenho do sistema a conhecidas razões de equivalência (Φ) e velocidades de filtração (v_{gf}), é essencial poder controlar a vazão dos dois gases.

A taxa de vazão do gás natural é medida (e controlada) com o auxílio de dois rotâmetros *Dwyer*, com uma escala de 0 a $3,93 \cdot 10^{-5}$ m³/s cada um. A pressão a montante dos rotâmetros é mantida constante por um regulador de pressão, conectado à tubulação.

A vazão do ar é medida (e controlada) com o auxílio de dois rotâmetros *Dwyer*, um com escala de $7,96 \cdot 10^{-5}$ a $7,96 \cdot 10^{-4}$ m³/s e outro de $3,93 \cdot 10^{-5}$ a $3,93 \cdot 10^{-4}$ m³/s. A montante dos rotâmetros é conectada a linha central de ar comprimido seco. O combustível se mistura ao escoamento de ar após os rotâmetros através de uma tubulação relativamente comprida, com uma velocidade relativamente alta, aproximadamente 3,5 m/s, o suficiente para garantir uma boa mistura.

5.4.3 Sistema de Aquisição de Dados

Um número de parâmetros é monitorado durante a operação do reator:

- ✓ Temperatura de saída dos trocadores de calor;
- ✓ Temperatura dos gases de exaustão;
- ✓ Temperatura do meio poroso próximo à zona de reação.

Todos esses parâmetros precisam de um sistema capaz de colhê-los, armazená-los e processá-los a cada intervalo de tempo. O Laboratório de Combustão e Energias Renováveis possui um sistema que integra a parte que faz a coleta e o armazenamento dos dados (hardware) com o processamento (software).

Os termopares são conectados ao condicionador de sinais (marca National Instruments, modelo cpf2020). A sua função principal é de amplificar o sinal de voltagem gerado pelos termopares, e ao mesmo tempo filtrar o ruído e fazer a compensação da junção fria, no caso dos TP. A saída tem um sinal padrão de 0 a 10V, onde 0V corresponde a 0°C e 10V, a 1750°C. Já o sinal de corrente admite valores entre 0 a 20 mA.

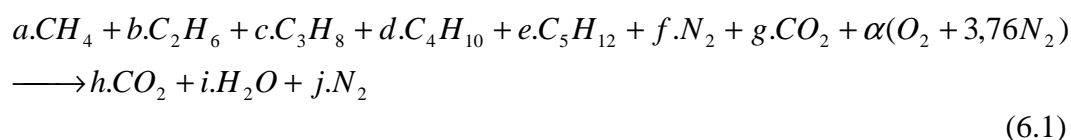
O número total de sensores de temperatura é 4: 1 (um) TP inserido no berço poroso do queimador; 1 (um) para a exaustão e 2 (dois) para os trocadores de calor. Para a aquisição

desses parâmetros, dois módulos específicos para TP estão disponíveis (marca National Instruments, modelo cFP-TC-120). Os módulos que fazem o condicionamento de sinais ficam montados na estrutura (National Instruments Compact Field), alimentado por uma fonte transformadora AC/DC (Phoenix 24 VDC).

O software que faz o processamento e a interface entre o hardware e o usuário é o National Instruments LabView 8.20. Esse programa se encarrega de organizar a aquisição de dados das variáveis físicas relevantes em uma interface gráfica interativa, a qual foi construída especificamente para fazer os experimentos. A interface é capaz de mostrar as temperaturas em tempo real dentro do reator e as temperaturas do gás e da água que passam pelo sistema. No entanto, as medições foram programadas para serem coletadas a cada 5 segundos. Outros parâmetros de utilidade que são mostrados, a título de auxílio no pós-processamento dos dados: a direção do escoamento, a razão de equivalência, a velocidade do escoamento, alarmes.

CAPÍTULO 6 – ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS DE OPERAÇÃO

O sistema de ignição lança-chamas permite realizar a ignição e o aquecimento de maneira eficiente, para misturas pobres, de forma a se obter alta eficiência de queima e baixa produção de poluentes. Entretanto, para estimar a vazão ar-combustível a ser empregada nos testes foi considerado o modelo de reação global, onde o combustível e o ar são queimados de forma plena, ou seja, gerando apenas CO₂, H₂O e N₂. Os coeficientes que indicam o percentual de cada espécie na composição do gás natural da rede de distribuição comercial, como mostra a Equação 6.1, podem ser identificados com base numa análise cromatográfica.



Para a avaliação da composição do gás natural utilizado nos testes, uma amostra foi remetida ao laboratório de análise cromatográfica do Departamento de Engenharia Química da UFC. Amostras do gás natural foram analisadas utilizando o processo de cromatografia gasosa, e o resultado é apresentado a seguir. Sendo, portanto, utilizado como base de cálculo nesse projeto.

Tabela 6.1: Valores brutos das amostras da análise cromatografia gasosa

Valores Brutos					
	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Amostra 04	Amostra 05
N2	3,021	0,013	0,013	0,014	0,014
Metano	1,000	0,500	0,500	0,600	0,900
CO2	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
C2	0,033	0,032	0,032	0,032	0,032
C3	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028
ISO-C4	0,000	0,500	0,000	0,000	0,000
N-C4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ISO-C5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
N-C5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
SOMATÓRIO	4,090	1,081	0,581	0,682	0,982

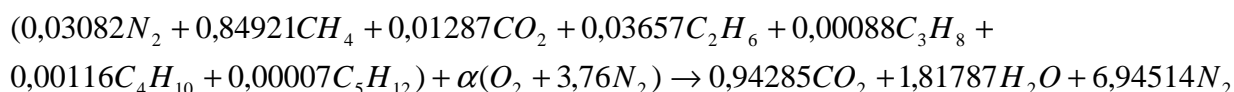
Tabela 6.2: Porcentagem de cada amostra da análise cromatografia gasosa

Porcentagem de cada amostra					
	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Amostra 04	Amostra 05
N2	3,021	3,215	3,057	2,999	3,117
metano	86,264	85,434	84,759	84,137	84,012
CO2	1,299	1,321	1,276	1,269	1,270
C2	3,714	3,674	3,650	3,628	3,618
C3	0,088	0,092	0,088	0,087	0,087
ISO-C4	0,063	0,094	0,072	0,069	0,090
NC4	0,012	0,115	0,033	0,000	0,032
ISO-C5	0,000	0,000	0,019	0,000	0,014
N-C5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabela 6.3: Composição do gás natural adotada para efeito de cálculos

Avaliação Final	
Porcentagem	
N2	3,082
Metano	84,921
CO2	1,287
C2	3,657
C3	0,088
ISO-C4	0,078
N-C4	0,038
ISO-C5	0,007
N-C5	0,000

Assim, balanceando a Equação 6.1 de acordo com as porcentagens dos componentes do gás natural e com a Tabela 6.3, tem-se:



Então, resulta em $\alpha = 1,83891$. Agora, calculando as massas de cada componente tem-se que:

$$m_{GásNatural} = [(0,84921 * 16) + (0,03657 * 30) + (0,00088 * 44) + (0,00116 * 58) + (0,00007 * 72)]$$

Portanto,

$$m_{GásNatural} = 14,79550g$$

Para o ar, a massa resultante é:

$$m_{Ar} = [(1,83891 * 32) + (1,83891 * 3,76 * 28)] = 58,84512 + 193,60044$$

$$m_{Ar} = 252,44556g$$

Sendo, a massa total:

$$m_{Total} = m_{GásNatural} + m_{Ar} = 14,79550 + 252,44556 = 267,24106 g$$

E a razão mássica combustível-ar para essa composição de gás natural é respectivamente:

$$\left(\frac{F}{A}\right)_{Teórico}_{Gás.Natural} = \frac{14,79550}{252,44556} = 0,05861$$

Da equação dos Gases Ideais, obteve-se que:

$$Pv = RT$$

E,

$$v = \frac{RT}{P}$$

Sendo,

$$\bar{R} = 8,314 \frac{KJ}{KmolK}$$

Então, como a operação ocorre a pressão atmosférica e 300 K, encontra-se que o volume específico para o gás natural é:

$$v = \left(\frac{8,314 \frac{KJ}{kmolK} * 300K}{16,22474 \frac{kg}{kmol} * 10^5 \frac{N}{m^2}} \right)$$

Adotando:

$$1kmol_{GásNatural} = 16,22474kg$$

Então,

$$v = 1,537 \frac{m^3}{kg}$$

Refazendo os mesmos cálculos para o ar, sendo:

$$R = \frac{\bar{R}}{PM_{AR}} = \frac{8,314 \frac{KJ}{kmolK}}{28,9 \frac{kg}{kmol}} = 0,287 \frac{KJ}{kgK} = 0,287 \frac{J}{gK}$$

Resulta em um volume específico igual a:

$$v = \left(\frac{0,287 \frac{KJ}{kgK} * 300K}{10^5 \frac{N}{m^2}} \right) = 0,861 \frac{m^3}{kg}$$

Da equação da continuidade, tem-se que:

$$\dot{m} = \rho AV$$

Mas, sendo a densidade igual a:

$$\rho = \frac{1}{v}$$

A vazão volumétrica dada por:

$$\dot{V} = AV$$

A área por:

$$A = \pi \frac{d^2}{4}$$

E finalmente, a razão de equivalência:

$$\Phi = \frac{\left(\frac{F}{A} \right) \text{Real}_{\text{GásNatural}}}{\left(\frac{F}{A} \right) \text{Teórico}_{\text{GásNatural}}}$$

Reunindo os cálculos efetuados até então,

Tabela 6.4 – Cálculo das razões ar-combustível para partida e operação com tubo de diâmetro 3/4".

	Ar		Combustível	
	Partida	Operação	Partida	Operação
SCFH	60,000	70,000	4,550	4,550
m³/ kg	0,861	0,861	1,537	1,537
m³/s	4,719.10 ⁻⁴	5,506.10 ⁻⁴	3,579.10 ⁻⁵	3,579.10 ⁻⁵
kg/s	5,481.10 ⁻⁴	6,395.10 ⁻⁴	2,328.10 ⁻⁵	2,328.10 ⁻⁵
Massa Total (g)	5,714.10 ⁻⁴	6,628.10 ⁻⁴	5,714.10 ⁻⁴	6,628.10 ⁻⁴
Φ	7,277.10 ⁻¹	6,238.10 ⁻¹	7,277.10 ⁻¹	6,238.10 ⁻¹
d (mm)	16,000	16,000	16,000	16,000
A (m²)	2,010.10 ⁻⁴	2,010.10 ⁻⁴	2,010.10 ⁻⁴	2,010.10 ⁻⁴
Vazão Total (m³/s)	5,077.10 ⁻⁴	5,864.10 ⁻⁴	5,077.10 ⁻⁴	5,864.10 ⁻⁴
Velocidade (m/s)	2,527	2,918	2,527	2,918

Assim, de conhecimento das vazões de partida puderam ser realizados os testes.

CAPÍTULO 7 - DISCUSSÕES

Para iniciar a realização dos testes, primeiramente foi preciso montar o protótipo do sistema de ignição. Um dos desafios enfrentados esteve relacionado à aquisição das conexões necessárias, sendo superado apenas após a confecção das mesmas.

Em seguida, com todos os constituintes prontos para a etapa de montagem, realizou-se o corte do tubo de quartzo, que necessitou de extremo cuidado devido à grande possibilidade de rachaduras, o que impossibilitaria a utilização do mesmo.

Segundo resultados anteriormente obtidos por pesquisadores do LACER (Barcellos, 2009), iniciaram-se os testes utilizando vazões de ar em torno de $4,719 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ e de combustível aproximadamente $3,579 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.

No entanto, os resultados diferiram do esperado, visto que o combustível de estudo utilizado anteriormente tinha sido o metano, e não o gás natural. Assim, com as vazões referidas acima foi observado que a frente de chama demorava bastante para se alojar no berço poroso, em alguns dos testes até demorou mais de 2 (duas) horas para atingir a temperatura ideal de estabilização.

O sistema de fornecimento de ar oriundo do compressor também era fonte constante de atenção e controle na realização dos testes, visto que a grande variação na vazão frequentemente tornava a mistura rica, fazendo com que a frente de chama se propagasse em direção oposta ao berço poroso, ou seja, em sentido contrário ao fluxo para se instalar na válvula corta-chama.

Foi observada após o início dos testes a questão da segurança da operação. Constatou-se diversas vezes a estagnação da chama nas proximidades da zona de entrada da mistura ar-combustível, acarretando elevação na temperatura nesse local. Essa foi, então, região pela qual foi introduzida a válvula corta-chama e, assim, minimizaram-se os riscos.

Visando otimizar o tempo de estabilização da frente de chama, resolveu-se, então, modificar as vazões utilizadas para iniciar o funcionamento do aquecedor. Assim, a vazão de ar foi alterada para $6,293 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ e a de combustível para $5,506 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$. Com essas vazões foi observado que a chama atingia rapidamente temperaturas aproximadamente iguais a 500K e se instalava no berço poroso. A partir deste momento, foi possível variar os valores da razão ar-combustível, pois a estabilidade não é mais prejudicada.

Os testes experimentais do protótipo puderam ressaltar algumas características do Sistema de Ignição Lança-Chamas desenvolvido para o Aquecedor de Queimador Poroso, evidenciando os aspectos operacionais desse sistema, tais como:

- Algumas relações entre velocidades de escoamento do combustível e do ar mostraram-se adequadas à ignição da mistura na pré-câmara e à propagação da chama ao longo do corpo do protótipo do sistema de ignição. Entretanto, todas elas mantiveram razões de equivalência correspondentes a misturas levemente pobres.

- A estabilização do processo de aquecimento do queimador de fato ocorre, quando a frente se instala definitivamente na matriz porosa. Entretanto, para que isso aconteça, a frente inicialmente se instala na pré-câmara e se mantém no bocal que conecta o tubo de quartzo, até que o berço poroso tenha quantidade de calor mínima suficiente para que a frente se transfira da pré-câmara para o berço poroso do queimador.

- A alumina (Al_2O_3) é dotada de alta condutividade térmica, o que faz dissipar rapidamente o calor para todo o meio poroso. Após armazenamento de certa quantidade de calor no meio poroso, a frente de chama lançada se instala e inicia o processo de aquecimento de forma gradativa;

- Em menos de 5 minutos, a frente de chama consegue dissipar calor suficiente para manter uma temperatura do meio poroso circunvizinho em valores superiores a 500 K (aproximadamente), e então, o processo de aquecimento se mantém estável, permitindo, inclusive, reduzir a razão de equivalência sem comprometer a estabilidade do processo de aquecimento.

- A partir do momento que a frente de chama aloja-se no meio poroso de forma estável, todo processo de aquecimento pode ser considerado como um processo normal semelhante à Combustão de Filtração, como ocorre no funcionamento regular do Aquecedor de Queimador Poroso. Inclusive, após certo tempo de funcionamento, quando a temperatura atinge valores superiores a 700 K, a mistura que penetra na pré-câmara e alimenta a frente de chama no meio poroso pode ser alterada sua razão de equivalência a valores ultra-baixos, próximos de 0.1.

- Os inúmeros testes experimentais evidenciaram uma relação entre o comprimento (L) e o diâmetro (D) do tubo-lançador que seria ideal para garantir o funcionamento desse sistema de ignição em desenvolvimento. Baseado nesses experimentos, a relação L/D que pode ser recomendável para projeto desse tipo de sistema não deve ser superior a 7 (sete).

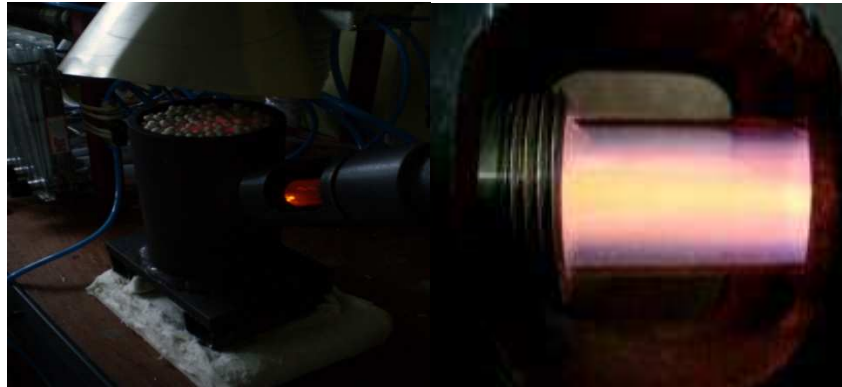


Figura 7.1 – Sistema em funcionamento

Foi realizado ainda um teste comparativo entre o aquecimento através de Fio Resistivo da Caldeira Superadiabática instalada e o Sistema de Ignição do Aquecedor do Queimador Poroso, utilizando o sistema de aquisição de dados National Instruments LabView 8.20 que registrou as temperaturas a cada 5 segundos até atingir aproximadamente 1200K que é a temperatura em que o queimador poroso pode realmente começar a operar. As temperaturas encontradas por cada instante de tempo foram plotadas e são apresentadas na Figura 7.2.

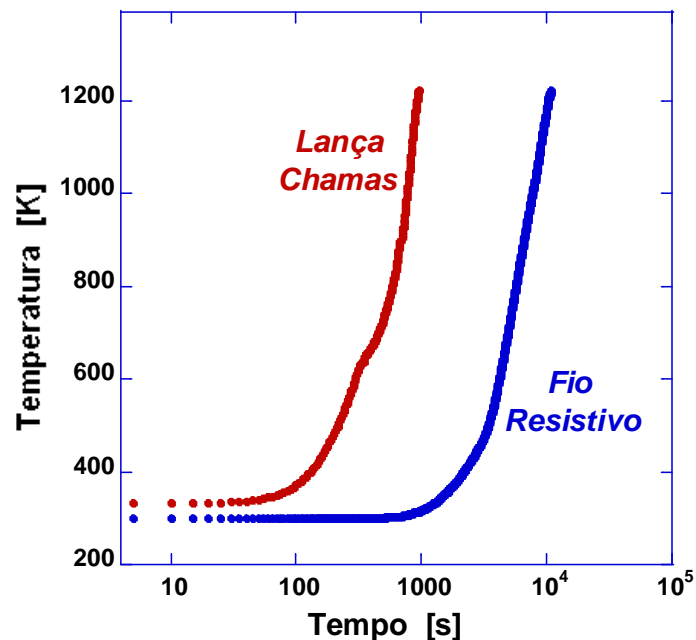


Figura 7.2 – Comparativo entre as Temperaturas de Aquecimento através do Sistema Lança-Chamas e por Resistência Elétrica *versus* Tempo

CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES

Com base no estudo teórico-experimental realizado no Sistema de Ignição Lança-Chamas desenvolvido para a Caldeira Superadiabática, algumas conclusões puderam ser tiradas:

- O sistema desenvolvido mostrou ser uma boa alternativa para substituir o atual sistema de aquecimento por resistência da Caldeira Superadiabática, de baixo custo de fabricação e montagem, bem como em termos operacionais, com um tempo significativamente reduzido para aquecimento da caldeira;
- Os resultados de simulação obtidos com o software ANSYS-CFX apresentaram boa coerência com o esperado e ajudaram a entender os fenômenos presentes no sistema de ignição em estudo;
- A partir dos estudos experimentais puderam ser identificadas relações e parâmetros adequados de projeto para estabelecer boas condições de funcionamento do Sistema de Ignição, de acordo com o diâmetro de cada tubo-lançador de chamas;
- Com esse estudo pode-se perceber que existe uma relação entre o comprimento do tubo e seu diâmetro com valor menor que 7 (sete), que pode ser recomendada para projeto do sistema de ignição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BABKIN, V. S., **Filtration combustion of gases, present state of affairs and prospects**, Pure and Applied Chemistry 65, 1993. pp. 335-344.
- BARCELLOS, W.M.; SABELIEV, A.V.; KENNEDY, L.A., **Low emission saturated steam boiler with reciprocal flow inert porous media combustor operating on ultra-lean natural gas/air mixtures**, Proceedings of the 17th Seventh International Conference on Energy for a Clean Environment, Clean Air, Lisbon, Portugal, 2003.
- BARCELLOS, W. M.; SABELIEV, A.V.; KENNEDY, L.A., **A Combustão em meios porosos de fluxo recíproco aplicada ao desenvolvimento de caldeira de vapor de baixa emissão e alta eficiência**, I Seminário da Rede Gás Energia Tecnologia e Desenvolvimento, Petrobrás, Brasil, 2006.
- BARCELLOS, W. M.; ROCHA, P. A. C.; SABELIEV, A.V.; AGUIAR, I. B. C., **Combustion wave propagation in flame-thruster ignition system applied to porous burner superadiabatic boiler**, 22nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Paraná, Brazil, 2009.
- BARRA, A.J.; DIEPVENS, G.; ELLZEY, J.L.; HENNEKE, M.R., **Numerical Study of the effects of material properties on flame stabilization in a porous burner**, Combustion and Flame 134, 2003. pp. 369-379.
- BINGUE, J. P.; SABELIEV, A. V.; FRIDMAN, A. A.; KENNEDY, L. A., **Hydrogen production in ultra-rich filtration combustion of methane and hydrogen sulfide**, International Journal of Hydrogen Energy 27, 2002. pp. 643-649.
- BINGUE, J. P.; SABELIEV, A. V.; FRIDMAN, A. A.; KENNEDY, L. A., **Hydrogen sulfide filtration combustion: comparison of theory and experiments**, Experimental Thermal and Fluid Science 26, 2002. pp. 409-415.
- BRENNER, G.; PICKENACKER K.; PICKENACKER O.; TRIMIS D., WAWRZINEK K.; WEBER T., **Numerical and Experimental Investigation of Matrix-Stabilized Methane/Air Combustion in Porous Inert Media**, Combustion and Flame 123, 2002. pp 201–213.

- CONTARIN, F., **Porous medium reciprocal flow burner with heat extraction**, Thesis submitted for partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering in the Graduate College of the University of Illinois at Chicago, Chicago, Illinois, 2001. 160 p.
- CONTARIN F.; BARCELLOS, W.M.; SABELIEV, A.V.; KENNEDY, L. A., **A Porous media reciprocal flow burner with embedded heat exchangers**, Proceed. ASME Summer Heat Transfer Conf., 2003. Paper no. HT2003-47098.
- CONTARIN, F.; BARCELLOS, W. M.; SABELIEV, A. V.; E KENNEDY, L. A., **Energy extraction from a porous media reciprocal flow burner with embedded heat exchangers**, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003. pp. 949-961.
- HARRIS, T. A.; WOOD. S, **Porous burners for lean-burn applications**, Progress in Energy and Combustion Science 34, 2008. pp. 667-684.
- HANNAMURA, K.; ECHIGO, R., **Thermal structure of superadiabatic combustion in porous media**, Thermal Engineering Conference, 1993.
- HANNAMURA, K.; ECHIGO, R.; ZHDANOK, S., **Superadiabatic combustion in porous media**, International Journal of Heat and Mass Transfer 36, 1993. pp. 3201-3209.
- HOFFMANN, J.G.; ECHIGO, R.; TADA, S.; YOSHIDA, H., **Experimental study on combustion in porous media with a reciprocating flow system**, Combustion and Flame 111, 1997. pp. 32-46.
- KAVIANY, M., **Principles of heat transfer in porous media**, Ed. Springer-Verlag, New York, NY, 1995.
- KENNEDY, L.A.; FRIDMAN, A.A.; SABELIEV, A.V., **Superadiabatic combustion in porous media: wave propagation, instabilities, new type of chemical reactor**, Fluid Mechanics Research 22, 1995. pp. 1-26.
- KENNEDY, L. A.; SABELIEV, A. V.; FRIDMAN, A. A., **Transient filtration combustion**, Proceedings of Mediterranean Combustion Symposium, Antalya, Turkey, 1999. pp. 105-139.
- RICHARDSON J. G., **The bane of ‘inhumane’ weapons and overkill: An overview of increasingly lethal arms and the inadequacy of regulatory controls**, Volume 10, Number 4 / December, Springer Netherlands, 2004.

SCHÖBERL, N., **An advancing front 2D/3D-mesh generator based on abstract rules**, **Computing and Visualization in Science**, Volume 1, No. 1, pp 41-52, Springer Berlin/Heidelberg, 1997.

TRIMIS, D.; DURST, F.; PICKENÄCKER, O.; E PICKENÄCKER, K., **Porous Medium Combustor versus Combustion Systems with Free Flames**, ISSHTEEC '97, Guangzhou, China, 1997. pp. 339-345.

ANEXOS

Anexo 1 – Fotos das Etapas de Montagem



Figura A.1 – Aquecedor na fase inicial



Figura A.2 – Aquecedor montado na bancada de teste



Figura A.3 – Aquecedor na bancada de teste com isolamento e instrumentos

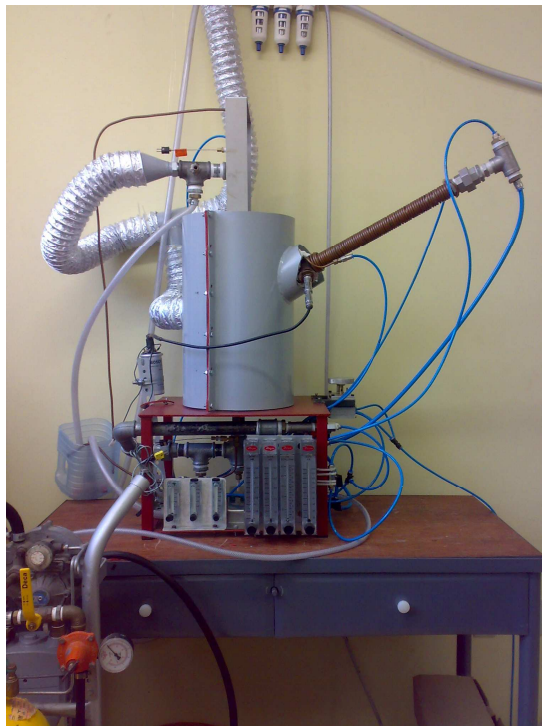


Figura A.4 – Aquecedor pronto para operação

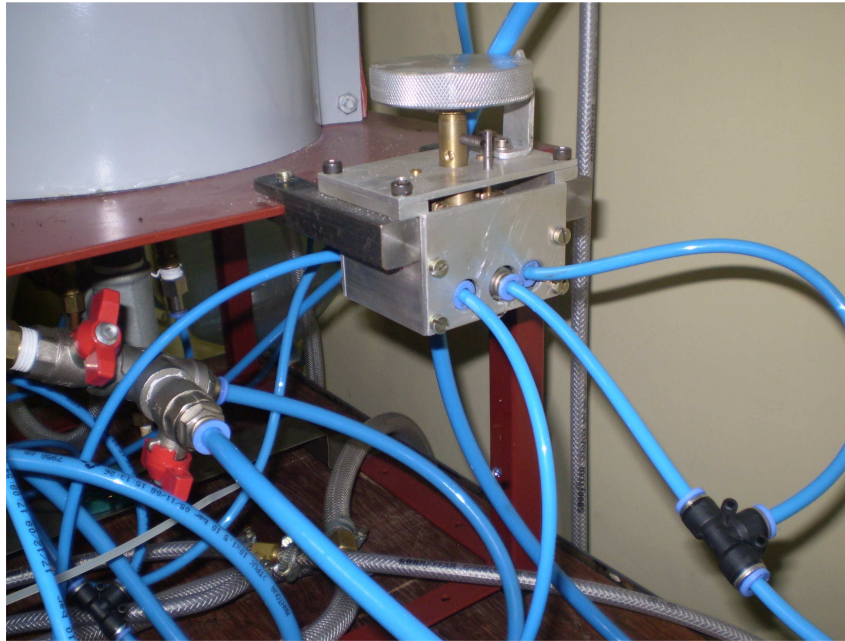


Figura A.5 – Detalhe da Válvula de Controle do Processo

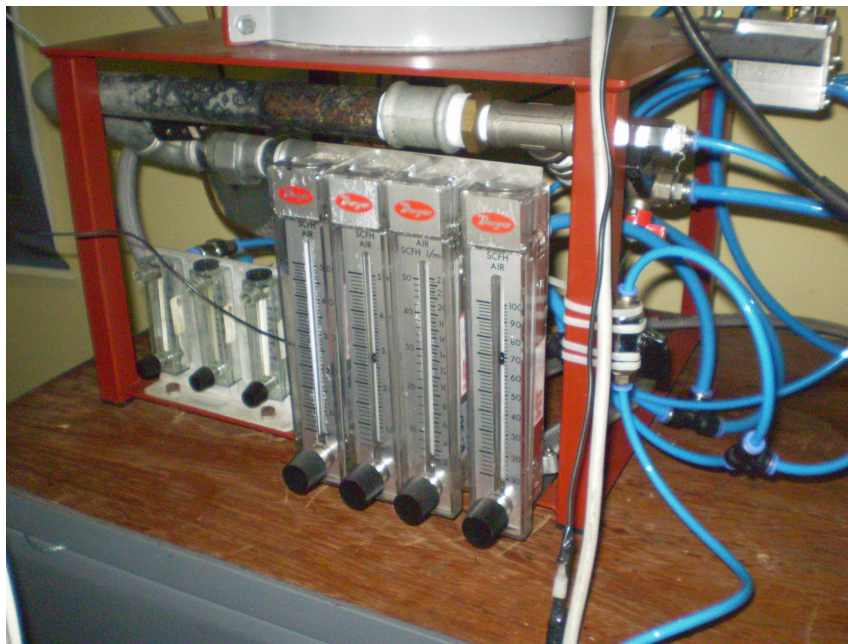


Figura A.6 – Detalhe dos rotômetros na fase de teste



Figura A.7 – Detalhe do Sistema de Ignição



Figura A.8 – Aquecedor com Sistema de Ignição Lança-Chamas em operação