

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DESENVOLVIMENTO DE UM REATOR DE LABORATÓRIO PARA ESTUDO DO IMPACTO DA PRESSÃO E DA TEMPERATURA NA TRANSFORMAÇÃO TERMOQUÍMICA DA BIOMASSA E DOS RESÍDUOS DENSIFICADOS

Pedro Henrique de Macedo Horta

Brasília, 06 de Dezembro de 2006

UNIVERSIDADE DE BRASILIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DESENVOLVIMENTO DE UM REATOR DE LABORATÓRIO PARA ESTUDO DO IMPACTO DA PRESSÃO E DA TEMPERATURA NA TRANSFORMAÇÃO TERMOQUÍMICA DA BIOMASSA E DOS RESÍDUOS DENSIFICADOS

Pedro Henrique de Macedo Horta

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro de Controle e Automação

Banca Examinadora

Prof. Patrick Rousset, IBAMA/Cirad (Orientador)

Prof. Gerson Pfitscher , UnB - CIC

Prof. Carlos Llanos, UnB - ENM

Dedicatória

*Dedico esse relatório a todos que
acreditaram e me apoiaram nesses cinco
anos de lutas, vitórias e alegrias.*

Pedro Henrique de Macedo Horta

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos que colaboraram de alguma forma com a realização desse trabalho, mas quero deixar claro que este começou há pelo menos cinco anos quando entrei na UnB, onde com certeza passei os melhores anos da minha vida. Portanto seria impossível citar todos os nomes, mas gostaria que todos soubessem que estas memórias estarão comigo para sempre.

Pedro Henrique de Macedo Horta

RESUMO

Nesse trabalho é feita a apresentação de todas as etapas de projeto e implementação de um reator de laboratório para estudo do impacto da pressão e da temperatura na transformação termoquímica da biomassa no laboratório do setor de Energia da Biomassa do Laboratório de Produtos Florestais do IBAMA. Esse trabalho foca-se na descrição da tecnologia empregada no desenvolvimento do equipamento, parte mecânica, etapas de controle de temperatura e pressão, aquisição de dados, justificando tecnicamente a escolha de cada componente e estratégia utilizada. Os resultados para avaliação do sistema foram obtidos por experimentos de pirólise de lenha (Eucalipto e Ipê) e torrefação de resíduos densificados (Briquetes).

Palavras Chaves: Biomassa, pirólise, pressão.

ABSTRACT

The aim of this work is to present all the steps involved in the project and implementation of a laboratory reactor for studying the impact of the pressure and temperature in the thermo chemical transformation of biomass in the Energy from Biomass sector's lab located inside of Forests Products Laboratory in IBAMA. This focus in the used technology's description of the developed equipment, mechanical part, temperature and pressure controls interfaces, data acquisition, technically justifying each component's choice and strategy adopted. The results for system evaluation were obtained in wood pyrolysis and densified residue toast experiments.

Keywords: Biomass, pyrolysis, pressure.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ASPECTOS GERAIS	1
1.2 OBJETIVOS DO PROJETO	1
1.3 CONTEXTO DO ESTUDO	1
1.3.1 A PRODUÇÃO E CONSUMO DE CARVÃO NO BRASIL	2
1.3.2 O IMPACTO AMBIENTAL	4
1.4 AS TECNOLOGIAS	5
1.4.1 TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO	6
1.4.2 AS TECNOLOGIAS DE PIRÓLISE SOB PRESSÃO	8
1.5 AUTOMAÇÃO	10
2 MATERIAIS E MÉTODOS	11
2.1 PRINCIPAIS ATIVIDADES	11
2.2 SITUAÇÃO INICIAL	11
2.2.1 LIMITES DE TRABALHO	12
2.3 SOLUÇÃO PROPOSTA	13
2.4 DESENVOLVIMENTO	13
2.4.1 LINHA DE PRESSÃO	13
2.4.2 SISTEMA DE AQUECIMENTO E ISOLAMENTO TÉRMICO	15
2.4.3 MEDIÇÃO	17
2.4.4 AQUISIÇÃO DE DADOS	19
2.4.5 CONTROLE	25
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
3.1 DESCRIÇÃO DA TECNOLOGIA DESENVOLVIDA	34
3.2 EXPERIMENTOS	35
3.2.1 ENSAIOS DE AJUSTE	35
3.2.2 ENSAIOS DE TORREFAÇÃO	38
3.2.3 ENSAIOS FINAIS	40
3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
4 CONCLUSÃO	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
ANEXOS	49
A.1 TABELA DE EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	49
A.2 PLANTA DE LIGAÇÕES ELÉTRICAS DO PAINEL DE CONTROLE	50
A.3 ANÁLISE IMEDIATA DOS EXPERIMENTOS DE AJUSTE	53
A.4 ANÁLISE IMEDIATA DOS EXPERIMENTOS FINAIS	57
A.5 PLANTAS EQUIPAMENTOS	63

LISTA DE FIGURAS

1.1	Consumo Energético Nacional.....	2
1.2	Conversão Energética da Biomassa	2
1.3	Consumo de Carvão por Setor	3
1.4	Consumo de Carvão por Estado	3
1.5	Bateria de Fornos do Rabo Quente, Plantar-MG.....	4
1.6	Origem do Carvão Consumido no Brasil	4
1.7	Produção Tradicional.....	6
1.8	Métodos Tradicionais Aprimorados	7
1.9	Métodos Tradicionais Aprimorados	7
1.10	Plantas modernas de produção de carvão na Holanda e França respectivamente....	8
1.11	Esquema do Reator da Universidade do Havai.....	8
1.12	Esquema 2 Reator da Universidade do Havai	8
1.13	Esquema e foto do reator PDU.....	9
1.14	Foto e esquema Reator Cirad	9
1.15	Diagrama de blocos das etapas da automação	10
2.1	Esquema de Funcionamento do Equipamento Cedido pelo Cirad	11
2.2	Esquema Proposto	13
2.3	Esquema da Linha de Pressão	14
2.4	Reator a) vista frontal, do reator montado e da tampa e copo separados. b) vista isométrica c)vista em corte.....	14
2.5	Válvula de Segurança.....	14
2.6	Válvula Solenóide Jefferson 1327	15
2.7	Forno de Aquecimento	15
2.8	Montagem do Sistema de Aquecimento e Isolamento.....	16
2.9	Comparação entre os desempenhos com e sem o sistema de isolamento.....	16
2.10	Posicionamento dos Termopares.....	17
2.11	a)Efeito observado por Thomas Seebeck b) Tensão de Seebeck	17
2.12	Faixa linear do termopar tipo k, com junta de referência a 0oC	18
2.13	Transmissor de Pressão TP-510	19
2.14	Mapa da entrada e saídas de gás do reator	19
2.15	Esquema de funcionamento da placa de aquisição Linx ADS0500.....	20
2.16	Interface de Aquisição Linx	20
2.17	Esquema de Comunicação PC/Controladores	21
2.18	Front Panel de um módulo do programa de aquisição de dados	22
2.19	Supervisório da câmara de torrefação.....	23
2.20	Supervisório do reator de pirólise.....	24
2.21	Malha de controle genérica com realimentação negativa.....	25
2.22	Painel de Controle	25
2.23	Controlador Novus N1100.....	25
2.24	Geração e propagação do sinal de PWM	27
2.25	Relé de Estado Sólido Novus	28
2.26	Relé de Estado Sólido Novus	28
2.27	Auto-Sintonia dos parâmetros PID	29
2.28	Auto-sintonia dos parâmetros PID Ampliado	29
2.29	PID auto-sintonizado.....	30
2.30	Ajuste fino.....	31
2.31	Malha de controle de pressão	32
2.32	Controle pressão ON-OFF.....	33
2.33	Controle pressão PI	33
3.1	Esquema do Sistema Desenvolvido	34
3.2	Hierarquia da comunicação do processo.....	35
3.3	Gráfico da evolução do ajuste 1	36
3.4	Gráfico da evolução do ajuste 2.....	36

3.5	Gráfico da evolução do ajuste 3	36
3.6	Gráfico de evolução do ajuste 5	37
3.7	Fotos do carvão e corpos de prova dos experimentos de ajuste	37
3.8	Evolução do terceiro ensaio de torrefação	38
3.9	Evolução do quarto ensaio de torrefação	38
3.10	Evolução do quinto ensaio de torrefação	39
3.11	Evolução do sexto ensaio de torrefação	39
3.12	Evolução do oitavo ensaio de torrefação	39
3.13	Evolução da temperatura e pressão do experimento 1	40
3.14	Evolução da temperatura e pressão do experimento 2	41
3.15	Evolução da temperatura e pressão do experimento 3	41
3.16	Carvão produzido no a) primeiro ensaio b) segundo ensaio c) terceiro ensaio.....	41
3.17	Evolução da temperatura e pressão do experimento 4	42
3.18	Evolução da temperatura e pressão do experimento 5	42
3.19	Evolução da temperatura e pressão do experimento 6	42
3.20	Carvão produzido no a) quarto ensaio b) quinto ensaio c) sexto ensaio	43
3.21	Evolução da temperatura do experimento 7	43
3.22	Evolução da temperatura do experimento 8	43
3.23	Evolução da temperatura do experimento 9	44
3.24	Carvão produzido no a) sétimo ensaio b) oitavo ensaio c) nono ensaio	44
3.25	A partir da primeira imagem superior a esquerda em sentido horário temos a sala de controle, vista do experimento de pirólise da sala de controle, planta de pirólise e planta de torrefação	45

LISTA DE TABELAS

1.1	Classes de Sistemas Dinâmicos	10
2.1	Equipamentos Antigos	12
2.2	Limites Trabalho	12
2.3	Características do Termopar Tipo K	18
2.4	Características do TP-510	19
2.5	Campos acessados no Mbmater.vi	21
2.6	Descrição dos campos disponíveis para o usuário	22
2.7	Descrição dos campos de acesso pelo usuário do supervisor do reator de pirólise	24
2.8	Desempenho do Controle do primeiro ensaio com controle interno	30
2.9	Parâmetros do controlador PID do segundo ensaio com controle interno	30
2.10	Desempenho do controle do segundo ensaio com controle interno	30
2.11	Parâmetros do controlador PID do terceiro ensaio com controle interno	31
2.12	Desempenho do controle do terceiro ensaio com controle interno	31
2.13	Parâmetros PID para controle da pressão	32

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

<i>bar</i>	Pressão	$[10^5 \times \text{N/m}^2]$
$^{\circ}\text{C}$	Temperatura Graus Celcius	$[\text{K}-273]$
$^{\circ}\text{C/min}$	Velocidade de Aquecimento	
CO	Monóxido de Carbono	
CO ₂	Dióxido de Carbono	
Hz	Frequência	$[1/\text{s}]$
Mp	Máximo sobre sinal	
tr	Tempo de Subida	$[\text{s}]$
T	Período	$[\text{s}]$

Símbolos Gregos

ζ	Coeficiente de Amortecimento
ω_n	Frequência Natural não Amortecida
π	Pi

Grupos Adimensionais

<i>Kp</i>	Ganho Proporcional
<i>Ki</i>	Ganho Integral
<i>Kd</i>	Ganho Derivativo
<i>Ti</i>	Tempo Integral
<i>Td</i>	Tempo Derivativo

Siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
Dt	Derivative Time
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia
Ir	Integral Rate
MME	Ministério de Minas e Energia
Pb	Probortional Band
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
PWM	Pulse Width Modulation
PV	Process Variable
SP	Set Point

1 INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo será feita a apresentação do relatório e do projeto seguida da contextualização do trabalho proposto. Por fim, serão apresentadas as tecnologias existentes de produção de carvão e uma breve noção dos conceitos de automação envolvidos no projeto.

1.1 ASPECTOS GERAIS

Este relatório é dividido em três partes principais. A primeira consiste de uma introdução ao tema com uma revisão de toda a bibliografia pesquisada para desenvolvimento do projeto, onde são apresentadas definições de conceitos importantes relacionados à produção de carvão vegetal, visão atual dos principais processos de produção, o impacto ambiental da produção de carvão, novas tecnologias e por fim a Pirólise Sob Pressão, onde serão apresentados sistemas semelhantes existentes.

Na segunda são relacionados os materiais utilizados para realização do projeto, os métodos para seleção dos componentes e cada etapa do desenvolvimento da nova tecnologia. Na terceira são expostos os resultados do projeto, alguns resultados experimentais para validar o sistema. Por fim o relatório será encerrado com uma breve conclusão sobre o trabalho realizado e serão apresentadas propostas para melhoria do sistema.

1.2 OBJETIVOS DO PROJETO

O objetivo do projeto é o desenvolvimento de um processo de produção de carvão sob pressão controlado em pequena escala, para isso um conjunto contendo um reator e um banco de resistências antes utilizado para liquefação deveria ser adaptado e as malhas de controle da temperatura e pressão projetadas. O sistema suportaria pressões de trabalho de até 30 bar e temperaturas que podem atingir 700 °C e abrangeria os dois primeiros níveis de automação da Pirâmide de Automação proposta por Moraes & Castrucci, ou seja, toda parte de controle e de instalações da planta além da interface homem-máquina, implementada em software e responsável também pela supervisão do processo. Com o desenvolvimento deste equipamento pretende-se viabilizar um estudo dos efeitos da carbonização sob pressão nas espécies brasileiras e comparar os resultados obtidos no Brasil com os resultados dos experimentos que já estão sendo realizados na França.

1.3 CONTEXTO DO ESTUDO

Em 2004 o Brasil consumiu 36,9 milhões de metros cúbicos de carvão, sendo esta uma importante fonte no balanço energético nacional (Figura 1.1). Cerca de 90% do carvão vegetal produzido no Brasil é utilizado no setor industrial na produção de ferro-gusa, aço, ferro-ligas e outros. A madeira de reflorestamentos, atualmente, é utilizada apenas em 47,8% da produção de carvão vegetal. Esse número já foi muito maior, atingindo em 1997 75% (Silviminas, 2004/05). No caso do carvão oriundo das florestas cultivadas, o principal estado produtor é Minas Gerais com 76,14% da produção nacional em 2004 (Silviminas, 2004/05). Já com relação à produção de carvão do extrativismo vegetal, destacam-se os estados do Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Maranhão, Goiás, Bahia e Paraná (IBGE, 2003).

Além da pressão sobre as florestas a produção de carvão é ainda foco de poluição do meio ambiente, pois a maioria dos processos clássicos de carbonização emite efluentes gasosos e vapores na atmosfera. Portanto, o desenvolvimento de novos processos que visem um aumento de rendimento sólido (carvão) em detrimento aos gasosos é interessante sobretudo sob o ponto de vista ambiental.

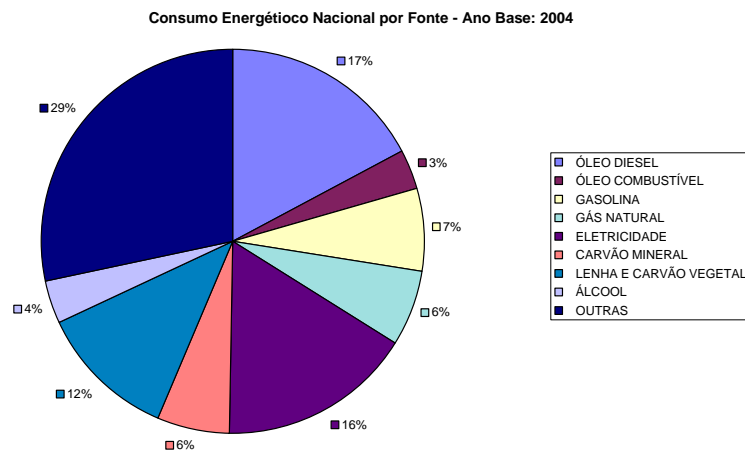


Figura 1.1: Consumo Energético Nacional (MME, 2004)

1.3.1 A PRODUÇÃO E CONSUMO DE CARVÃO NO BRASIL

Antes de falar sobre a produção de carvão no Brasil é interessante definir alguns conceitos correlatos que serão muito usados no decorrer desse trabalho:

Biomassa: O termo biomassa foi criado por volta de 1975 para descrever os materiais naturais que podem ser utilizados como combustível. Ela inclui toda matéria orgânica de origem vegetal ou animal, inclusive os materiais procedentes de sua transformação natural ou artificial. (Pinheiro & Sampaio, 2001)

Carvão Vegetal: O carvão vegetal é o resultado da combustão incompleta da biomassa. Todos os tipos de biomassa podem ser convertidos em carvão vegetal, mas utiliza-se principalmente a lenha. (Pinheiro & Sampaio, 2001)

Pirólise: A palavra pirólise é oriunda do grego onde piro é fogo, calor e lise decomposição, ou seja, decomposição pelo calor. Na prática a pirólise é um processo de conversão térmica da biomassa a temperaturas entre 400 e 800°C, na ausência total ou na presença uma pequena quantidade de ar. À baixa temperatura (<500°C) é utilizada para a produção de carvão vegetal. (Pinheiro & Sampaio, 2001)

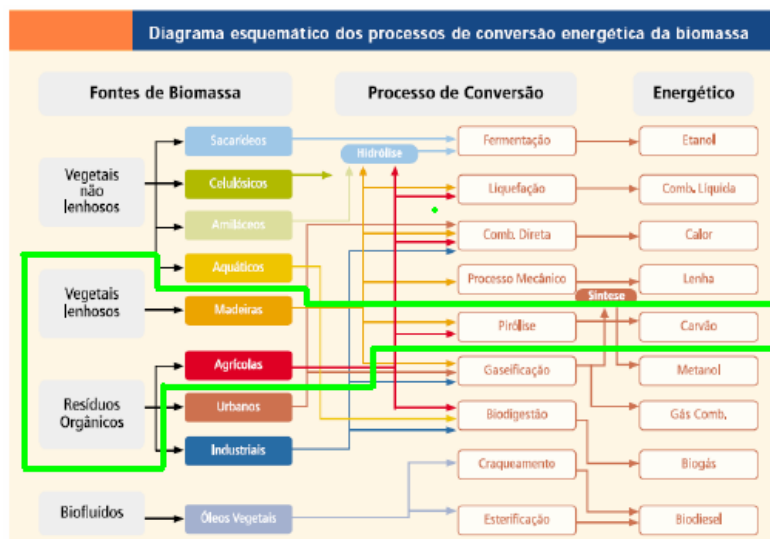


Figura 1.2 – Conversão Energética da Biomassa (ANEEL, 2005)

Atualmente Minas Gerais é responsável pela maior parcela da produção nacional de carvão Vegetal, sendo este carvão oriundo principalmente de florestas plantadas. A maior parte do carvão produzido no Brasil, cerca de 70% (Pinheiro & Sampaio) é fabricado em Fornos de alvenaria conhecidos como Rabo Quente, ver figura 1.5. O setor de Indústrias Siderúrgicas (Figura 1.3) é o principal consumidor desse produto no país, e que por estar concentrado em Minas Gerais esse também é o estado que mais consome carvão vegetal (Figura 1.4).

Consumo de Carvão Vegetal por Setor em 2004 (mdc)

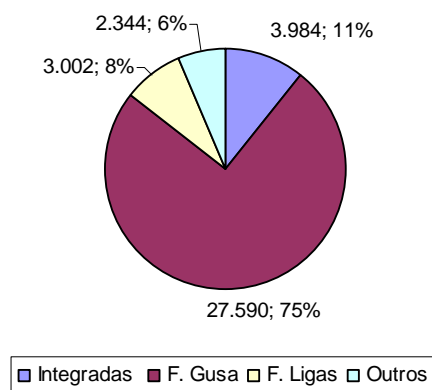


Figura 1.3 – Consumo de Carvão por Setor (Silviminas, 2004/05)

Consumo de Carvão Vegetal por Estado (mdc)

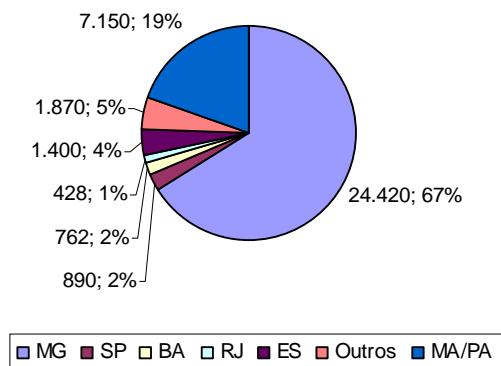


Figura 1.4 – Consumo de Carvão por Estado (Silviminas, 2004/05)

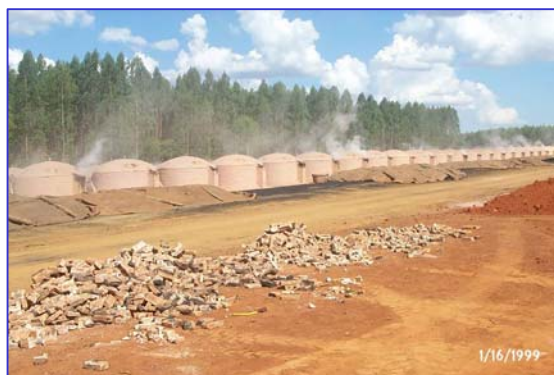


Figura 1.5 - Bateria de Fornos do Rabo Quente, Plantar-MG (Arquivo Pessoal Patrick)

1.3.2 O IMPACTO AMBIENTAL

Os principais efeitos danosos da produção de carvão sobre o meio ambiente são dois, primeiro a pressão que esse setor realiza sobre as florestas e segundo a emissão de gases na atmosfera.

Infelizmente, ainda hoje grande parte da biomassa carbonizada é retirada de florestas nativas como pode ser visto na Figura 1.6. Os principais estados produtores de carvão oriundo do extrativismo vegetal são: Mato Grosso do Sul, com 23,64% das 2 185 950 toneladas produzidas no Brasil em 2004; Minas Gerais, com 19,85%; Maranhão, 19,70%; Goiás, 15,36%; Bahia, 10,54% e Paraná, com 6,24% (IBGE, 2003).

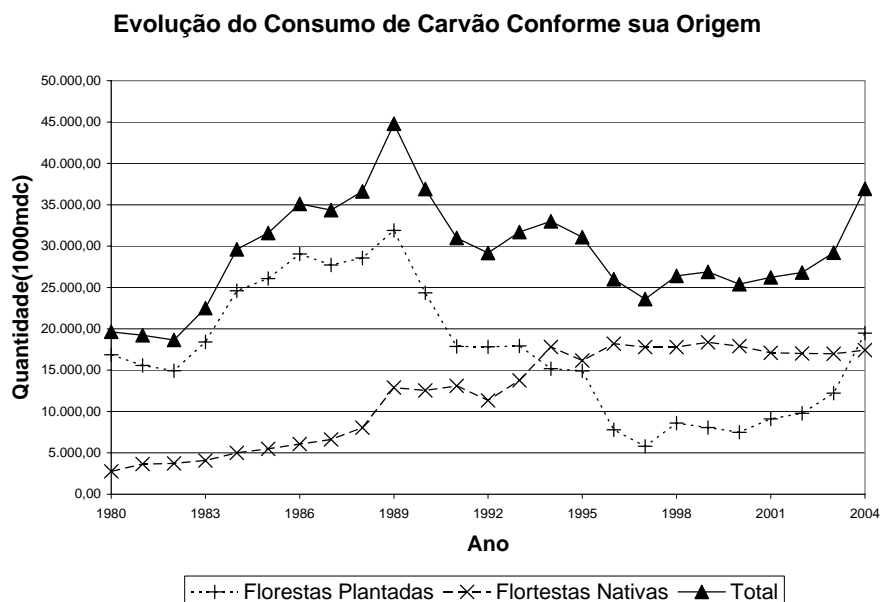


Figura 1.6 – Origem do Carvão Consumido no Brasil (Silviminas, 2004/05)

Quanto à emissão de gases, durante a produção são despejados efluentes gasosos e vapores (ácidos, gases estufa, CO_2 e CO) na atmosfera, representando mais de 70% da matéria prima (NUMAZAWA, 2000), fazendo da produção de carvão uma grande vilã do efeito estufa, uma vez que seu uso é difundido internacionalmente. Grande parte dos resíduos lançados no ambiente poderiam ser utilizados como fonte de energia, por exemplo: gases produzidos durante o processo de pirólise são combustíveis, além disso, o alcatrão, o sub-produto líquido pode ser sintetizado em combustível para motores ou mesmo queimado diretamente para fins energéticos.

Portanto, com a crescente preocupação com as emissões de CO₂ e outros gases estufa, em conjunto com a redução da oferta de combustíveis fósseis, o interesse por fontes renováveis de energia como a biomassa vem aumentando. No entanto, é preciso aprimorar as tecnologias de produção e utilização desse recurso. Com isso a produção de carvão pode evoluir para um processo limpo e sustentável de geração energética.

1.4 AS TECNOLOGIAS

Para desenvolvimento de novas tecnologias de carbonização da biomassa, primeiramente precisamos entender o que é um carvão de qualidade, quais fatores e em que esses fatores influenciam na qualidade do carvão.

A qualidade do carvão vegetal varia de acordo com o seu fim e pode ser indiretamente determinada a partir de suas propriedades físicas (dureza, friabilidade e densidade), ou pela análise imediata (carbono fixo, teor de voláteis e cinzas). A análise imediata, teor de carbono fixo (74-81%), matérias voláteis (18-23%), umidade (2-4%) e cinzas (1-3%) é um índice de qualidade do carvão bem aceito pelo mercado (Pinheiro & Sampaio, 2001). Os fatores que irão influenciar no rendimento e na qualidade são: (Quirino, 2003)

Da madeira:

- densidade;
- umidade;
- dimensões das peças;

Do processo:

- temperatura final de carbonização;
- velocidade de aquecimento;
- pressão.

Influência da temperatura final de carbonização: quanto maior a temperatura final alcançada durante o processo, maior a teor de carbono fixo e menor o rendimento gravimétrico, consequência de uma maior degradação da biomassa e maior liberação de voláteis e gases não condensados (Pinheiro & Sampaio, 2001).

Influência da velocidade de aquecimento: quanto mais lento for o processo de carbonização menor será a decomposição da biomassa depois de atingida a temperatura de estabilidade, resultando em um maior rendimento do carvão (Pinheiro & Sampaio, 2001).

Influência das dimensões das peças: com amostras maiores, devido ao processo de transmissão de calor, e ao tempo de propagação da frente de carbonização no interior da amostra a taxa de transferências de calor é menor e são obtidos maiores rendimentos (Pinheiro & Sampaio, 2001).

Influência da densidade da madeira: a densidade da biomassa praticamente não tem influência sobre o rendimento. Entretanto, existe uma correlação entre a densidade da madeira e a densidade do carvão. Quanto maior a densidade da madeira, maior a densidade do carvão produzido. Como a produção de um forno está diretamente relacionada com a quantidade (massa) de madeira introduzida, quanto maior a densidade da lenha usada, maior será a massa de carvão produzida (Pinheiro & Sampaio, 2001).

Influência do teor de umidade da madeira: o rendimento gravimétrico da carbonização depende do teor de umidade da biomassa. Quanto maior o teor de umidade, maior a quantidade de energia necessária para a secagem. A energia necessária para aquecer a madeira e evaporar a umidade é alta, e nos fornos de combustão interna, esta energia é obtida pela queima de parte da carga a ser carbonizada, resultando por consequência numa menor produção de carvão (Pinheiro & Sampaio, 2001).

Influência da pressão e do fluxo de gás: a pressão é um fator que tem efeito direto sobre o aumento de massa do carvão em detrimento à formação de líquido durante o processo de conversão termoquímica da madeira. Essa constatação tem evidência de que as substâncias que ficam retidas no interior do carvão, devido à pressão, sofrem o fenômeno de coqueificação, causando o acúmulo de massa sólida no carvão (Pinheiro & Sampaio, 2001). Além da pressão, o fluxo de gás durante o processo também está relacionado com o rendimento gravimétrico, quanto maior for esse fluxo menor o rendimento encontrado (Antal & Mok, 1990 e Antal, 2003).

Dos fatores citados a cima, a pressão foi até recentemente desprezada nos estudos da pirólise e nos processos de produção atuais. A partir da década de oitenta ganhou importância após trabalhos publicados pelo pesquisador da Universidade do Hawai, Michael Antal. Alguns trabalhos de pirólise sob pressão têm mostrado a possibilidade de aumentar esse rendimento sólido significativamente, variando entre 41 e 62%*, bem acima dos valores dos sistemas de carbonização à pressão atmosférica (25% - 37%), ou seja, um aumento de até 148%. (Antal et al, 1996)

*Obs: Esse rendimento gravimétrico nada tem a ver com a qualidade do carvão. Análises mais cuidadosas desses resultados foram feitas pelo pesquisador Antal no seu trabalho publicado em 2000 (Antal et al, 2000), onde a análise imediata do carvão produzido foi realizada e verificado um ganho de qualidade, mesmo que em menores proporções.

1.4.1 TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO

O carvão é utilizado como combustível por seres humanos desde a idade da pedra e até o início do século XX todo o carvão era produzido por métodos tradicionais, ou seja, em poços escavados no chão e cobertos por terra (Figura 1.7). Nesses “buracos” a combustão de parte da madeira produz o calor necessário para carbonizar a outra. Por ser um sistema simples e barato, este ainda pode ser visto em alguns países em desenvolvimento, no entanto esse processo apresenta rendimento muito baixo, para cada: 1Kg de carvão produzido são consumidos de 8 à 12Kg de madeira (Stassen, 2002), a qualidade do carvão produzido é extremamente inconsistente e a poluição por gases tóxicos e alcatrão é intensa.



Figura 1.7 – Produção Tradicional (Girard, 2002)

Após a década de 70 os métodos de produção de carvão vêm sendo aprimorados em busca de maiores rendimentos e qualidade do produto final:

Métodos Tradicionais Aprimorados: fornos de alvenaria com chaminés e fornos de metal em pequena escala (Figura 1.8). Nesses processos a combustão parcial da madeira também é responsável pela produção do calor para carbonização. No entanto, estes além de possuírem uma melhor vedação permitem um maior controle da chama dentro do forno e com isso uma produção de 1Kg de carvão para cada 6 à 8Kg (Stassen, 2002) de madeira. Entretanto, esse tipo de forno é menos acessível e necessita de uma boa prática de uso para rendimentos satisfatórios.

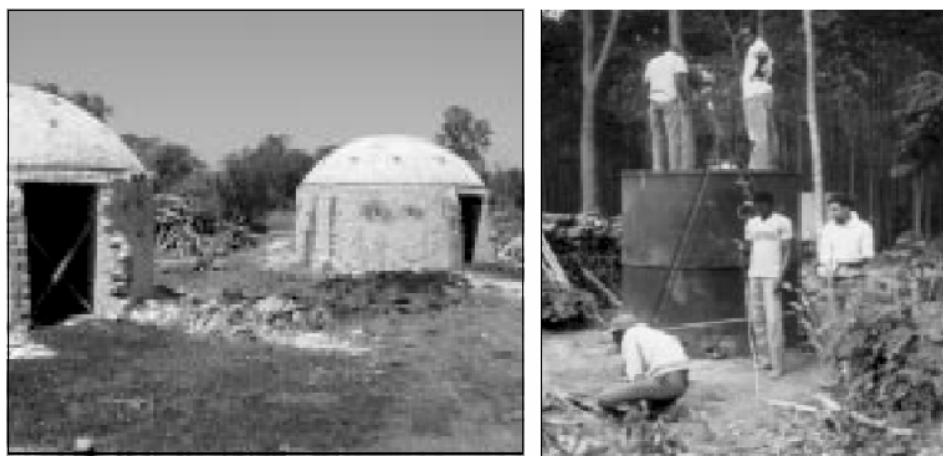


Figura 1.8 – Métodos Tradicionais Aprimorados (Stassen, 2002)

Tecnologias de Produção Industrial: a demanda industrial por carvão no século XX incentivou o surgimento de novas tecnologias de produção em larga escala. Fornos de metal ou alvenaria de grande porte e retortas de carbonização contínua (Figura 1.9), apesar de terem melhorado os rendimento (1Kg de carvão para 5 a 7Kg de madeira (Stassen, 2002)) o problema da poluição persiste nesse tipo de processo. Fábricas de carvão emitem grandes quantidades de fumaça, fuligem e alcatrão. Esse tipo de instalação ainda pode ser vista em operação na Europa, e na América do Sul.

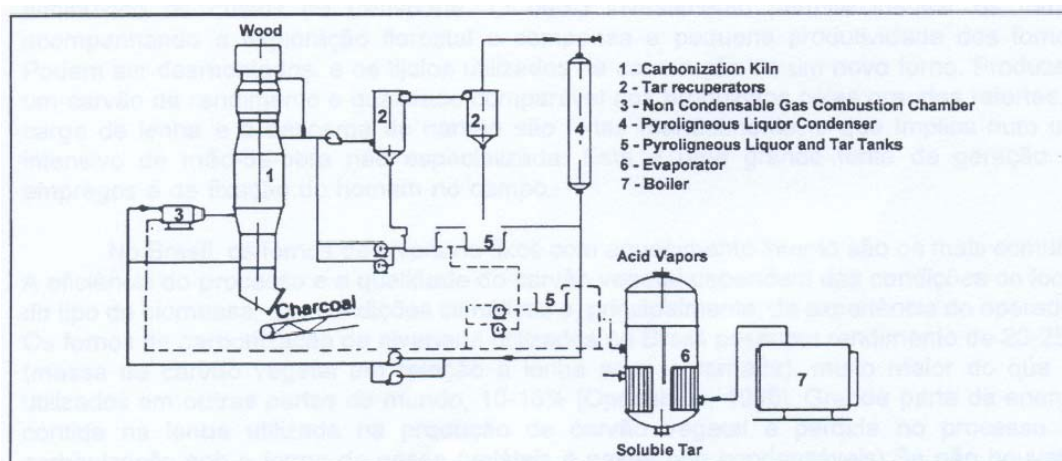


Figura 1.9 – Retorta de Carbonização Contínua da Acesita (Pinheiro & Sampaio)

Sistemas de baixa emissão e alto rendimento: atualmente a principal tendência da produção de carvão é um aumento do desempenho ambiental dos processos. Nos novos sistemas o alcatrão e os gases produzidos durante a carbonização são levados a uma câmara de combustão e o calor gerado nessa fornalha é levado aos fornos de pirólise e de secagem da biomassa, economizando assim a grande parte da madeira que seria queimada nesses processos e alcançando o rendimento de 1Kg de carvão para 3 à 4Kg de madeira (Stassen, 2002). Em virtude da câmara de combustão à alta temperatura todas as partículas são completamente consumidas, reduzindo assim a emissão de gases tóxicos como monóxido de carbono, óxido de nitrogênio e outros a níveis aceitáveis internacionalmente.

As novas fábricas de produção de carvão de baixa emissão e alto rendimento necessitam de um alto investimento, porém, em muitos casos o aumento do rendimento e da qualidade na produção mais do que compensam esses custos e como resultado disso essa nova tecnologia tem se espalhado rapidamente ao redor do globo não apenas em países desenvolvidos como França e Holanda (Figura 1.10), mas também na China, Gana, África do Sul, Estônia e Singapura (Stassen, 2002).



Figura 1.10 – Plantas modernas de produção de carvão na Holanda e França respectivamente (Stassen, 2002 e Girard, 2002)

1.4.2 AS TECNOLOGIAS DE PIRÓLISE SOB PRESSÃO

Nenhum dos diferentes sistemas citados anteriormente trabalha com a pressão como uma das variáveis do processo. No entanto, em alguns de laboratórios internacionais equipamentos de carbonização sob-pressão já foram implementados. Para desenvolvimento de um processo semelhante é interessante analisar cada um desses sistemas:

Reator University of Hawaii 1 (EUA): Consiste de dois micros reatores de aço 316 com 4,64mm de diâmetro interno capaz de suporta pressões de trabalho de até 25bar e temperaturas de até 800 °C, com rampas de aquecimento de até 20 °C/min. (Antal & Mok, 1983).

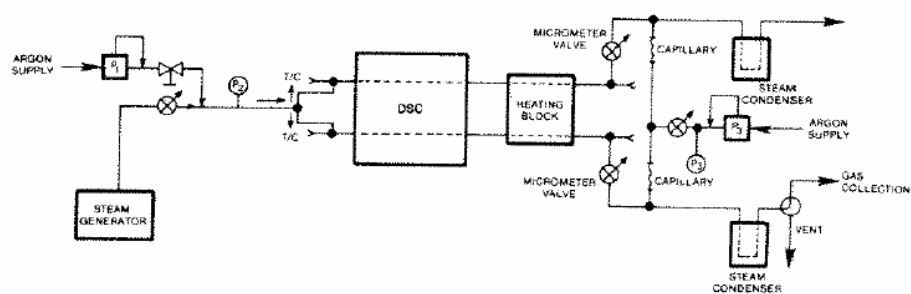


Figura 1.11 – Esquema do Reator da Universidade do Havaí (Antal & Mok, 1983)

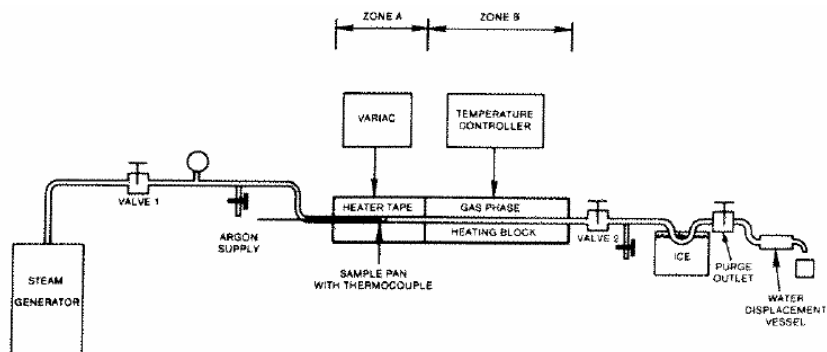


Figura 1.12 – Esquema 2 Reator da Universidade do Havaí (Antal & Mok, 1983)

Reator PDU University of Hawai 2(EUA): Um reator de maiores proporções capaz de ser alimentado com pedaços de madeira de 15cm de diâmetro e 30cm de comprimento. O reator em si é um grande cilindro de aço com 25cm de diâmetro interno e 163cm de altura, com pressões de trabalho de até 7bar e temperaturas de 350 °C. O cilindro metálico é aquecido por resistências elétricas e pela queima dos próprios gases oriundos da pirólise da biomassa. (Antal et al, 1996).

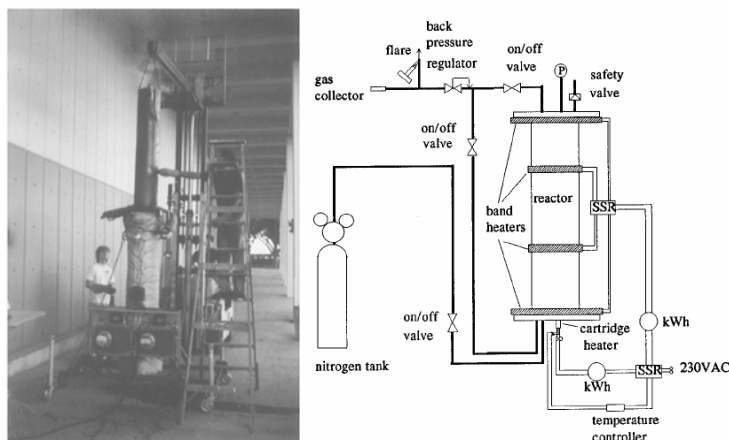


Figura 1.13 – Esquema e foto do reator PDU (Antal et al, 1996)

Reator Cirad (França): O equipamento consiste de um reator com 0,2 metros cúbicos aquecido por resistências elétricas. A pressão de trabalho é conseguida pela adição de gás inerte no interior do reator, a pressão é controlada por uma válvula na saída e por um regulador de pressão na entrada que repõe a perda de pressão com o evento de abertura da válvula. A pressão de trabalho máxima do reator é de 10bar e a temperatura máxima é de 600 °C (temperatura de controle na resistência), com rampa de aquecimento de até 10 °C/min. É interessante notar que esse equipamento permite a medição da temperatura em seis diferentes pontos do reator e com isso a noção do que está acontecendo no interior do aparelho é mais precisa (Numazawa, 2000).

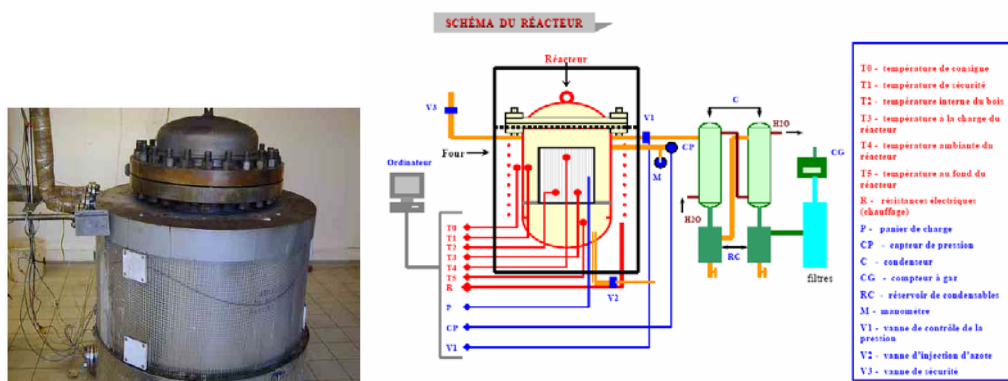


Figura 1.14 – Foto e esquema Reator Cirad (Numazawa, 2000)

1.5 AUTOMAÇÃO

Conhecendo as tecnologias existentes e as variáveis envolvidas no processo de carbonização da biomassa é possível projetar com mais segurança e precisão um equipamento funcional para realização da pirólise sob pressão. No seu livro os autores Moraes & Castrucci propuseram algumas etapas para automação de uma planta industrial, a partir dessa proposta foi elaborado o grafo das etapas seguidas durante o projeto, ver figura 1.15. Algumas etapas do gráfico original estarão presentes no projeto do sistema proposto, pois o sistema será estudado como sistema dinâmico dirigido pelo tempo (tabela 1.1), os métodos de trabalho serão detalhados mais adiante nos próximos capítulos.

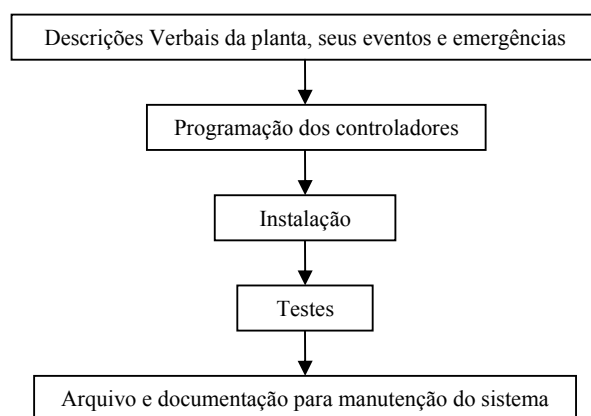


Figura 1.15 – Diagrama de blocos das etapas da automação (Moraes & Castrucci, 2001)

Tabela 1.1 – Classes de Sistemas Dinâmicos (Moraes & Castrucci, 2001)

Acionados por	Descritos por	Nomes
Tempo (time-driven)	Equações diferenciais na variável tempo	Contínuos no tempo
Tempo (time-driven)	Equações de diferenças na variável tempo	Discretos no tempo
Eventos (event-driven)	Álgebra de boole, redes de petri, programas computacionais	A eventos, logísticos

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados as estratégias de desenvolvimento do sistema proposto, relacionando e justificando os caminhos trilhados durante o projeto.

2.1 PRINCIPAIS ATIVIDADES

O primeiro passo do trabalho foi definir as principais atividades que deveriam ser desenvolvidas durante a sua realização, enumeradas a seguir:

- Escrever um procedimento de trabalho;
- Contatar as empresas para escolha da tecnologia melhor adaptada em função do orçamento e do uso final;
- Selecionar essa nova tecnologia com o orientador;
- Fazer as modificações com o novo sistema de regulação;
- Testar a regulação;
- Escrever um procedimento de trabalho;
- Estudar a possibilidade de regulação com computador;
- Estabelecer um plano de experiência com o engenheiro florestal;
- Realizar uma série de testes para avaliar impacto da relação temperatura/pressão sobre a pirólise;

2.2 SITUAÇÃO INICIAL

Identificadas as principais etapas do projeto foi realizada uma reunião com no IBAMA na qual foram identificados os equipamentos disponíveis, definidos os limites de temperatura e pressão de trabalho e sugeridas algumas possibilidades para implementação.

Foi definido nessa mesma reunião todo que o projeto passaria pela adaptação de um equipamento importado da França, composto por um reator (tampa e copo), mesa suporte, um compressor, forno de aquecimento, regulador de temperatura, painel de conexões da linha de pressão (eletro válvula, conexões, manômetro, regulador de pressão), misturador, além de um segundo painel para coleta da saída dos gases. O esquema de funcionamento pode ser observado na figura 2.1. Antes utilizado para liquefação da biomassa, o sistema estava em desuso no Cirad e grande parte dos seus componentes sucateados ou tecnologicamente ultrapassados.

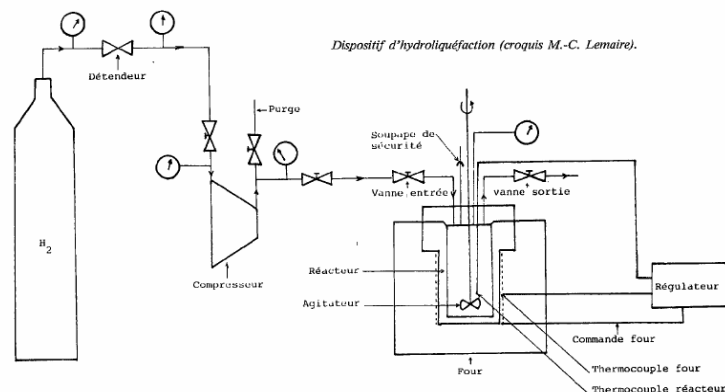


Figura 2.1 – Esquema de Funcionamento do Equipamento Cedido pelo Cirad (Doat, 1984)

Conhecido o material disponível e suas funcionalidades baseados na única literatura disponível, um artigo publicado na revista “Bois et Forets des Tropiques”(Doat, 1984), foi possível definir quais componentes poderiam ser utilizados no projeto, ver tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Equipamentos Antigos

Equipamento	Aproveitamento	Observações
Painel Branco (ligações, eletro válvula...)	Não	Equipamento pouco preciso para necessidades do projeto
Compressor	Depende	Inicialmente não será aproveitado pelas pressões de trabalho muito elevadas.
Reator(Tampa e Copo)	Sim	Mas com algumas adaptações para termopares e de entrada e saída dos gases.
Regulador de Temperatura	Não	Tecnologicamente Ultrapassado
Mesa	Sim	Adaptações para facilitar montagem.
Misturador	Não	Não interessa ao projeto.
Painel Azul(Saída dos Gases)	Não	Totalmente sucateado.
Forno	Sim	Feito sob medida para o reator e em funcionamento, não faz sentido ser substituído.

2.2.1 LIMITES DE TRABALHO

Foram definidos também os limites de temperatura e pressão de trabalho, fatores determinantes para o avanço do projeto, principalmente em relação à pressão, pois quanto maior a pressão, mais caro o processo, além do que para pressões muito elevadas faz-se necessário o uso do compressor. Os parâmetros definidos podem ser visualizados na tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Limites Trabalho

Limites de Trabalho
Temperatura: 800°C
Pressão: 10bar

A temperatura de 800°C é a limite de trabalho do equipamento disponível, já a pressão de 10bar foi selecionada pelo baixo custo e facilidade de se encontrar no mercado equipamentos para esse trabalho. Contudo existe a possibilidade de se elevar esse limite apenas com a troca de um componente da linha de pressão, no caso o regulador de pressão.

2.3 SOLUÇÃO PROPOSTA

Com conhecimento do que deveria ser aproveitado, modificado ou mesmo adquirido para execução do projeto, foi montado um esquema base, ver figura 2.2, utilizado como guia para compra de equipamentos e montagem.

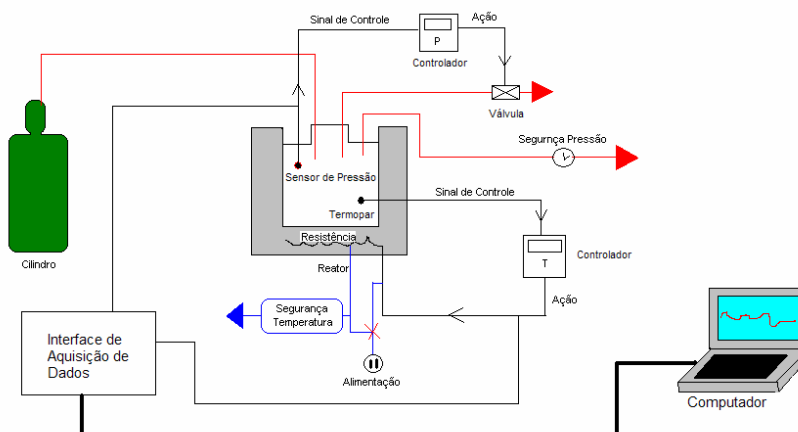


Figura 2.2 – Esquema Proposto

As variáveis de controle seriam temperatura e pressão. Uma interface de aquisição de dados faria a coleta das informações dos sensores e passaria para o computador para análise da evolução dos experimentos. O sistema seria separado em duas malhas de controle independentes, uma responsável pela pressão e a segunda pelo controle da temperatura. A pressão seria fornecida pelo cilindro de gás nitrogênio gerando uma atmosfera inerte no interior do reator, otimizando, assim, o processo de pirólise da biomassa. A segurança do processo deveria ser feita tanto na linha de pressão quanto para a parte elétrica.

A partir desse ponto, foram feitos estudos das tecnologias existentes no mercado, análise dos equipamentos disponíveis no próprio IBAMA, contatos com diversas empresas e, finalmente, os produtos selecionados foram adquiridos e a montagem do sistema pôde ser iniciada. Todos os recursos utilizados para implementação do projeto proposto estão relacionados na tabela A1, em anexo no final do trabalho.

2.4 DESENVOLVIMENTO

Durante o desenvolvimento do trabalho procurou-se seguir o esboço proposto, apresentado na figura 2.2. Cada etapa desse processo será detalhada a seguir, porém dividida em cinco partes principais para facilitar o entendimento do processo e justificar separadamente a escolha de cada uma das tecnologias adotadas.

2.4.1 LINHA DE PRESSÃO

É constituída de todos os elementos por onde existe fluxo do gás nitrogênio, responsável por pressurizar o sistema e criar a atmosfera inerte necessária para o estudo do processo de pirólise. Um esquema da linha de pressão e seus componentes pode ser observado na figura 2.3 a seguir.

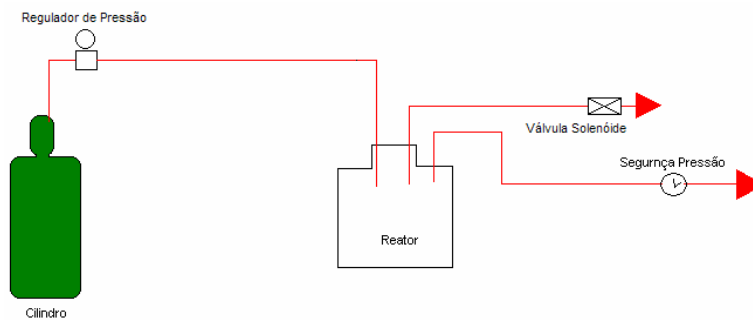


Figura 2.3 – Esquema da Linha de Pressão

Tubulação: feita somente com componentes encontrados na cidade, amplamente difundidos no mercado e de fácil acesso e manutenção, é responsável por levar o gás do cilindro ao reator e da saída do reator às válvulas de segurança e controle. Montada com tubos de aço resistentes a pressão de 300bar e temperatura de até 500°C, conexões em aço com anilha rosca 1/4NPT e uma mangueira flexível para conexão do regulador de pressão à tubulação rígida que suporta pressões de até 50bar e temperaturas de 200°C.

Regulador de Pressão: Regulador ProStar Gold com faixa de trabalho de 0 a 10Kgf/cm² (0 – 9,8bar), equipamento comprado junto ao fornecedor do cilindro. O regulador de pressão tem a função de reduzir a pressão de saída do cilindro, em um cilindro carregado a pressão de gás é de 200Kgf/cm², com o regulador pode-se controlar a pressão de saída por uma válvula de diafragma, que se fecha de acordo com a pressão desejada, garantindo mais segurança e controle para o processo.

Reator: O reator é o coração do processo e é importante tanto como componente da linha de pressão quanto na transferência de calor do sistema. Formado por duas partes principais, uma tampa e um copo de 400cm³ onde são depositadas as amostras, a vedação entre as duas peças é feita por uma junta metálica na face inferior da tampa que é pressionada no copo por sete parafusos. Feito de aço XN26TW (Doat, 1984), aço refratário rico em níquel próprio para peças que serão submetidas a temperaturas elevadas (Barrau, 2004), o reator suporta pressão de até 750bar e temperatura de 800°C. Uma série de modificações teve de ser feita nesse componente para uma melhor adaptação ao novo processo: padronização das roscas de entrada e saída, confecção de adaptadores para permitir a inserção de termopares, além do fechamento furos na tampa que não teriam serventia.

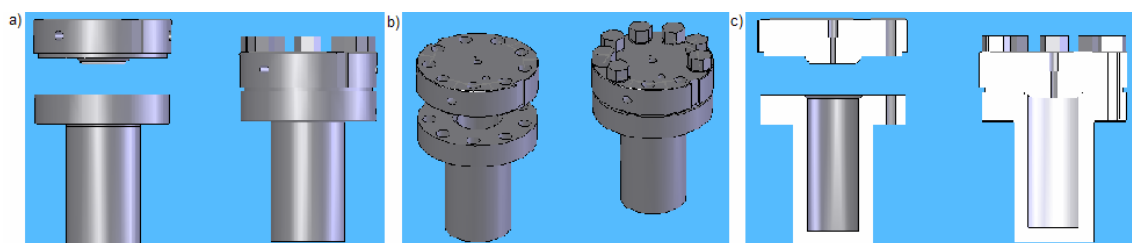


Figura 2.4 – Reator a) vista frontal, do reator montado e da tampa e copo separados. b) vista isométrica c) vista em corte.

Válvula de Segurança: Para fazer a segurança de pressão durante o processo a válvula de alívio modelo SS-4R3A da fabricante Swagelok foi selecionada por permitir que esta trabalhe em diversas faixas de pressão, bastando apenas substituir uma mola que faz regulação na pressão de abertura.



Figura 2.5 – Válvula de Segurança

Válvula de Controle: Para controlar a pressão do sistema foi escolhida uma válvula do tipo solenóide normalmente aberta com retorno por mola da Jefferson 1327 Series, com pressão de trabalho de até 50bar e resistente a temperatura de 180°C. Ver Figura 2.6. Ela foi escolhida por ser uma válvula de pequeno porte capaz de resistir a grandes pressões e com um diâmetro de passagem relativamente pequeno, 1,25mm, o que significa possibilidade de um melhor controle da vazão e por consequência da pressão uma vez que o volume do reator é muito pequeno, 400cm³, possui a vedação de Teflon que é resistente a fluídos corrosivos. Além disso, por ser uma válvula do tipo solenóide AC 60Hz para 220V é de fácil adaptação com os equipamentos que temos em mão, controladores, relés etc.



Figura 2.6 – Válvula Solenóide Jefferson 1327

2.4.2 SISTEMA DE AQUECIMENTO E ISOLAMENTO TÉRMICO

Os sistemas de aquecimento e isolamento abrangem todos os componentes responsáveis pela geração de calor e manutenção da temperatura, durante o processo.

Forno de Aquecimento: “O forno é um aparelho preparado para fornecer altas temperaturas, composto de um bloco de bronze usinado sobre o qual é espiralada uma resistência de aquecimento submetida a altas correntes.” (Doat, 1984) Ao redor do bloco uma camada de isolante térmico direciona o calor para o reator e inibe as perdas para o ambiente, alimentado por 220VAC e capaz de fornecer temperaturas de até 800°C.

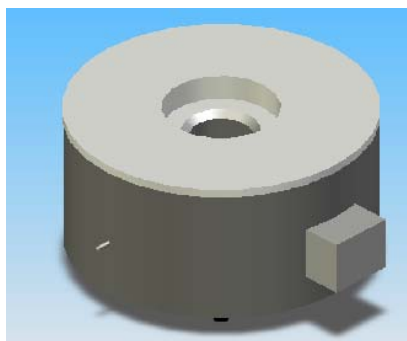


Figura 2.7 – Forno de Aquecimento

Sistema de Isolamento: Além do isolamento do forno com os primeiros testes observou-se uma grande disparidade entre as temperaturas internas do reator e entre essas e a do forno. Para tentar aumentar o rendimento do processo foi projetado uma camada de isolamento do sistema constituída de uma junta de amianto para impedir o contato direto da mesa com o reator, além de uma cuba de alumínio recheada com material isolante para proteger a tampa. A montagem e o desempenho desse sistema podem ser observados nas figuras 2.8 e 2.9 a seguir.

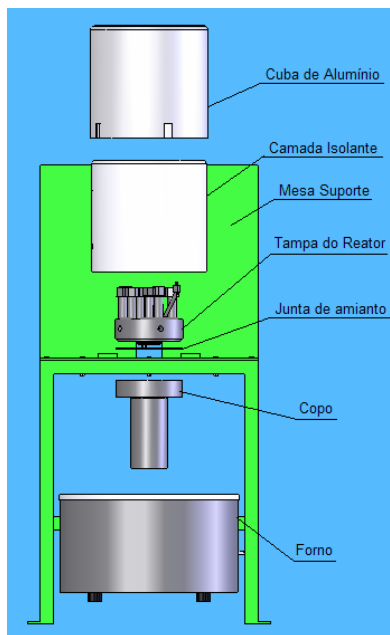


Figura 2.8 – Montagem do Sistema de Aquecimento e Isolamento

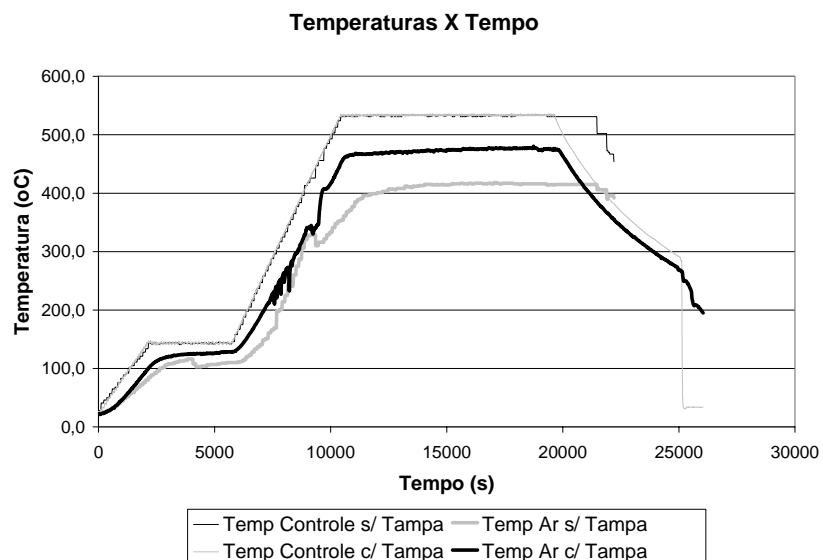


Figura 2.9 – Comparação entre os desempenhos com e sem o sistema de isolamento

Analisando o gráfico da figura 2.9 pode-se observar que as temperaturas de controle são bem semelhantes e percebe-se uma grande aproximação destas e da temperatura interna do reator quando o sistema de isolamento é utilizado, melhorando a transferência de calor e reduzindo o consumo de energia do processo.

Sistema de aquecimento da válvula de controle: após a realização de alguns testes do equipamento verificou-se grande acúmulo de alcatrão na válvula de controle, que muito viscoso prejudicava o funcionamento da mesma. Para evitar a condensação do alcatrão antes que este passasse pela válvula, foi adicionado um sistema responsável por elevar a temperatura da válvula até o seu limite de trabalho, 180°C. O sistema é composto de uma fita de aquecimento que abraça toda a saída de gases que é protegida por lã de vidro e chega até a válvula de controle.

2.4.3 MEDIÇÃO

A medição é uma etapa fundamental numa malha de controle e é feita por instrumentos conhecidos como sensores ou transdutores. Estes instrumentos são sensíveis a determinada característica do sistema (temperatura, luminosidade, pressão, etc.) e traduzem essa característica (geralmente na forma de uma tensão ou corrente elétrica) de modo que possa ser facilmente mensurável e visualizada. A escolha dos sensores deve ser feita de acordo com as necessidades de cada processo, levando-se em conta sensibilidade, fundo de escala, resolução e exatidão. Durante a pirólise sob pressão os dois parâmetros fundamentais e que deverão ser medidos são temperatura e, logicamente, a pressão.

Medição da Temperatura: A temperatura é medida em vários pontos durante todo o processo por termopares tipo K, na resistência, em dois pontos no interior do reator e na válvula solenóide. Na figura 2.10, pode-se visualizar as posições dos dois termopares no interior do reator e do terceiro no contato do reator com o forno. Para possibilitar o posicionamento dos termopares no interior do reator e ainda assim garantir a estanqueidade do sistema foram adquiridas conexões de dupla anilha desenvolvidas pela Swagelock.

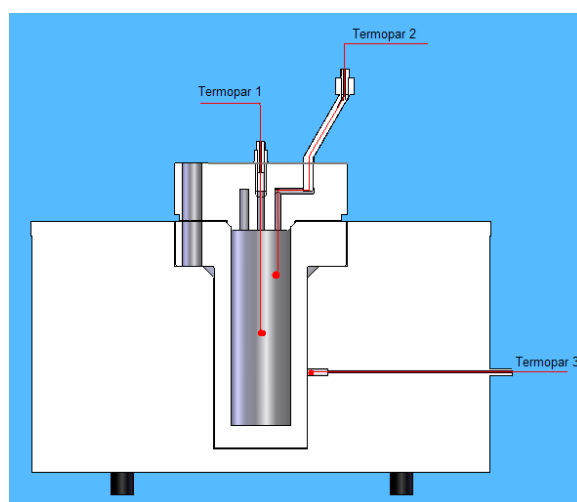


Figura 2.10 – Posicionamento dos Termopares

Os sensores termopar são intrusivos ao processo, ou seja, necessitam estar em contato direto com seu objeto de medição e foram escolhidos por permitirem medições em ampla faixa de temperaturas, baratos e de fácil adaptação com os demais componentes disponíveis. O seu princípio de funcionamento é muito simples e foi observado pela primeira vez por Thomas Seebeck em 1821 (Omega Temperature Handbook, 2005): quando dois fios compostos por tipos diferentes de metais são unidos nas duas extremidades e uma dessas é aquecida percebe-se um fluxo de corrente entre as duas extremidades (Figura 2.11 - a). Se o circuito é quebrado, ao invés da corrente há uma tensão elétrica entre os dois fios, conhecida como “Seebeck Voltage” (tensão de Seebeck (Figura 2.11 - b)).

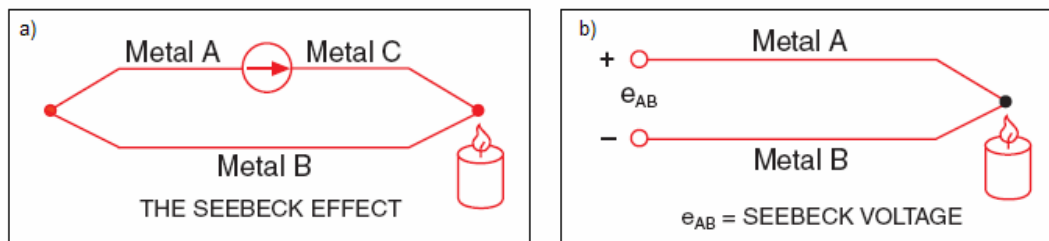


Figura 2.11- a) Efeito observado por Thomas Seebeck b) Tensão de Seebeck (Omega Temperature Handbook, 2004)

No entanto existem alguns cuidados a serem tomados quando se trabalha com sensores termopares, começando com o fato de que estes são lineares apenas para uma faixa de temperaturas. No caso do termopar tipo K pode-se considerar que essa faixa vai de -200 à 1250°C como mostrada no gráfico da figura 2.12. Outro ponto importante é quanto à forma de ligá-los, é preciso utilizar cabos extensores especiais, feitos dos mesmos materiais da junta para que não seja criada no contato do sensor com o cabo de extensão uma nova junta, gerando um erro de medição. No entanto não é possível evitar a criação da nova junta nos contatos com o instrumento que fará a leitura de tensão entre os dois fios do termopar. A compensação desta, bem como a da junta fria (junta de referência), no caso do equipamento utilizado é feita por software nos controladores (reguladores) - estes serão abordados nas próximas seções. Na tabela 2.3, é possível ver as principais características dos termopares tipo k.

Tabela 2.3 – Características do Termopar Tipo K (Omega Temperature Handbook, 2004)

Característica	
Faixa de Operação	-200 à 1250oC
Limites de Erro	2,2oC ou 0,75% para temperaturas acima de 0oC e 2,2oC ou 2% para temperaturas abaixo de 0oC
Faixa de Operação do cabo de extensão	0 à 200oC

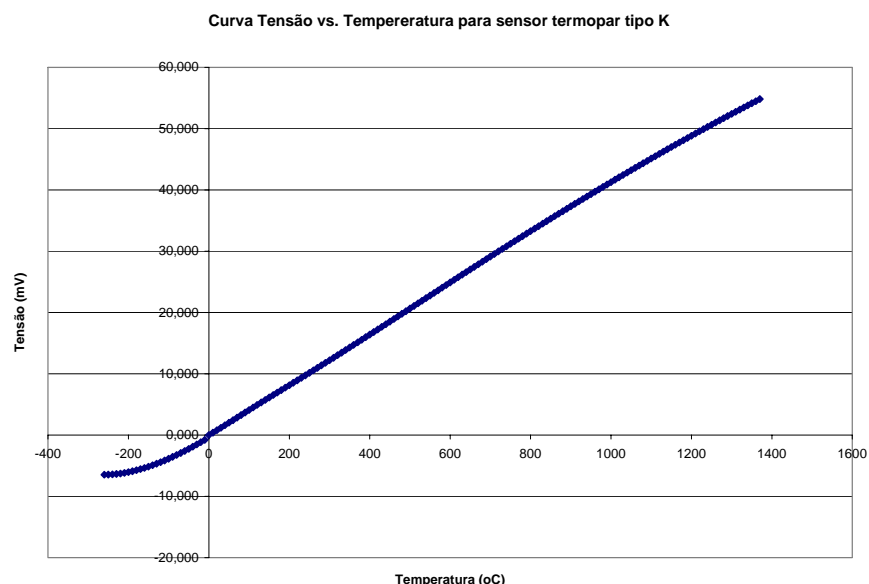


Figura 2.12 – Faixa linear do termopar tipo k, com junta de referência a 0°C

Medição da Pressão: Durante o processo a pressão é medida em apenas dois pontos, na entrada de gás, por um manômetro acoplado ao regulador de pressão e pelo transmissor de pressão TP-510 (figura 2.13), fabricado pela Huba Control e adquirido junto à empresa nacional Novus. O transmissor traduz o sinal de pressão para uma saída de 4-20mA e necessita de uma fonte de tensão de excitação fornecida por uma fonte regulada para bom funcionamento.

O TP-510 é acoplado diretamente à linha de pressão em uma saída exclusiva do reator, para que resíduos nocivos do processo, como o alcatrão, não cheguem até ele. Um mapa com as entradas e saídas do reator pode ser visto na figura 2.14. Esse sensor é um transmissor de pressão relativa, ou seja, transmite a diferença entre a pressão do processo e do meio em que ele se situa, no caso o próprio ambiente, e foi escolhido por ser compacto, de fácil adaptação aos demais equipamentos disponíveis, confiável independentemente da temperatura de trabalho, fácil de montar e usar. Na tabela 5 pode-se visualizar as suas principais características.



Figura 2.13 – Transmissor de Pressão TP-510

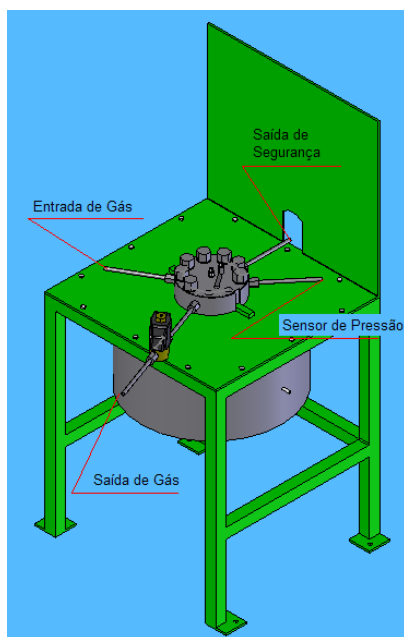


Figura 2.14 – Mapa da entrada e saídas de gás do reator

Tabela 2.4 – Características do TP-510

Especificações TP-510	
Faixa de medição	0 - 120bar
Sinal de saída	4 - 20mA
Tensão de excitação	8 a 33Vdc
Precisão	< 0,5% do fundo de escala
Sobre Pressão	360bar
Pressão de Ruptura	720bar
Temperatura Ambiente	-40 – 85oC
Temperatura do fluido de processo	-40 - 150oC
Resposta Dinâmica	< 2ms
Conexão ao processo	Rosca 1/4NPT macho

2.4.4 AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição de dados é fundamental para o propósito do projeto, tanto para obtenção de informações durante a construção do equipamento, possibilitando o seu aprimoramento, quanto para o seu uso final que é o de possibilitar estudos em laboratório da pirólise sob pressão. Essa interface deve ser capaz de reconhecer os dados dos sensores com menor influência possível sobre a medição e esses dados devem ser armazenados para análise posterior.

Essa etapa foi bastante trabalhada durante o desenvolvimento do sistema. Inicialmente os dados adquiridos pelos reguladores, equipamentos que serão explicados na próxima seção, não eram armazenados automaticamente. Para isso, era preciso digitar as informações dos sensores no PC manualmente. Para eliminar esse desconforto tínhamos três possibilidades através de um sistema de aquisição de dados disponível no IBAMA: o Linx ADS0500; o ALMEMO, equipamento portátil emprestado pelo Cirad; ou, ainda, desenvolver um software capaz de buscar os dados diretamente nos controladores através do barramento RS-485 disponível nos controladores.

Todas as três opções foram implementadas. O ALMEMO, após o primeiro ensaio, apresentou problemas e teve que voltar à França para reparos. Em seguida a interface de aquisição ADS0500 foi estudada e instalada, mas devido às dificuldades de operação e à subutilização dos controladores foi definido que deveria ser projetado um software. Inicialmente a linguagem escolhida para programação

foi o LabVIEW, por ser de implementação simples e rápida. Entretanto após uma visita técnica do Engenheiro do Cirad, Philippe Gallet, foi implementado um programa de aquisição na linguagem de programação Delphi, nos mesmos moldes dos utilizados no Cirad, padronizando o sistema nos laboratórios do Brasil e França, facilitando assim o desenvolvimento em conjunto de novas soluções. Uma breve explicação sobre a interface Linx, o programa LabVIEW e o programa em Delphi será apresentada a seguir.

Linx: É uma placa de aquisição de sinais com 16 canais de entrada configuráveis para diferentes tipos de sinais analógicos. No projeto é utilizada para adquirir as temperaturas dos sinais fornecidos pelos termopares. Os sinais que vão para os controladores não podem ser adquiridos pela placa, pois a impedância de entrada da mesma poderia ter alguma influência sobre eles. No caso do sinal de temperatura foi possível duplicá-lo, já para o do sensor de pressão é inviável. O esquema de funcionamento pode ser visualizado na figura 2.15. O ganho A é calculado de acordo com a faixa de temperaturas que se pretende trabalhar convertendo o sinal do sensor para faixa de conversão do conversor AD ($\pm 10V$). A placa possui ainda um sensor LM34 para compensação da junta fria do termopar. Depois de amplificada as entradas analógicas são convertidas em sinais digitais pelo conversor AD com o auxílio de uma tabela de linearização construída, ver anexos. Na placa existe apenas um conversor e sua entrada é selecionada por um multiplexador. O sinal digital é enviado para o computador via rede (Ethernet), o aparelho possui seu próprio endereço de IP, que também pode ser configurado.

A placa de aquisição vem acompanhada por dois softwares, um responsável pela comunicação (AqDados) com o computador e o outro para análise dos sinais coletados (AqDAnalysis), no primeiro programa é feita a configuração da aquisição, frequência de leitura, duração do experimento, seleção dos canais, tipo de dado, etc.

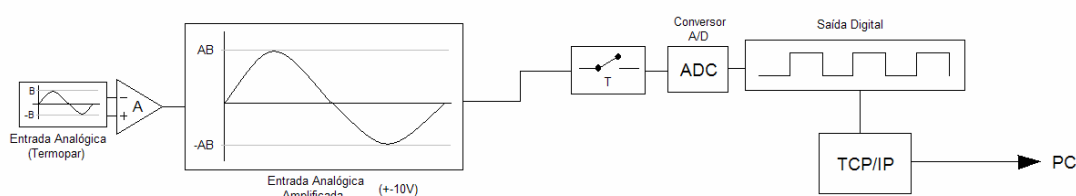


Figura 2.15 - Esquema de funcionamento da placa de aquisição Linx ADS0500

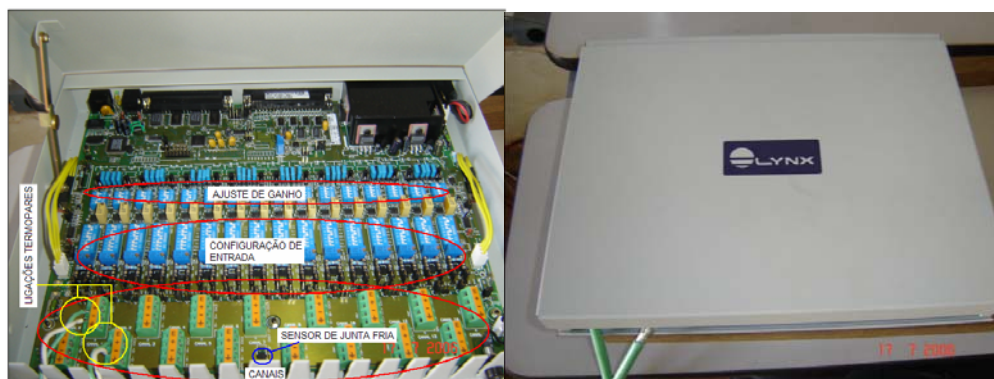


Figura 2.16 – Interface de Aquisição Linx

Programa LabVIEW: LabVIEW é uma linguagem de programação simples e intuitiva, desenvolvida pela multinacional National Instruments. Os programas são feitos através da conexão de blocos que podem representar desde um comando simples, como uma soma, até um conjunto complexo de funções, como o acesso à uma das portas seriais do computador. Cada diagrama de blocos montado é chamado instrumento virtual (vi = virtual instrument) e podem ser usados como sub-vi, ou seja, como blocos dentro de outros diagramas. Cada instrumento gera um *front panel* que é uma interface gráfica

e permite ao usuário dar entradas para o programa, visualizar gráficos, valores de variáveis, ou seja, interagir com o sistema durante sua execução.

Para projetar o programa, primeiramente foi feito um estudo do protocolo de comunicação Modbus (Modicon Inc, 1996), implementado nos controladores. O protocolo, de arquitetura aberta estabelece uma comunicação baseada na hierarquia mestre-escravo, onde os escravos (controladores) respondem aos comandos do mestre (computador). Os controladores disponíveis permitem apenas comandos de leitura e escrita em um registrador: cada registrador corresponde a uma função dos controladores, ao todo são 241 funções acessíveis. Cada escravo possui um endereço (0-255) que o identifica, é possível a alocação de até 32 escravos em um mesmo barramento RS485 (barramento de comunicação a dois fios halfduplex, ver esquema).

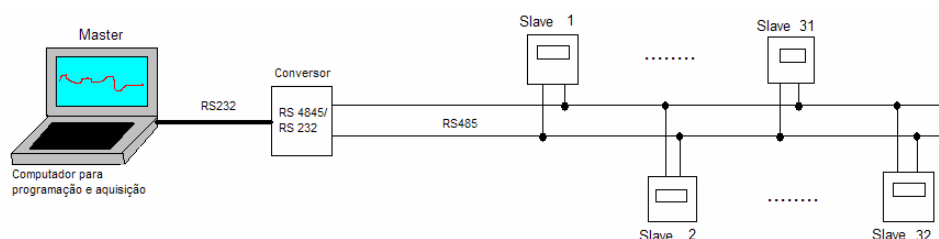


Figura 2.17 - Esquema de Comunicação PC/Controladores

Conhecendo o processo de comunicação, foi adquirido um conversor RS485/RS232 para permitir o acesso da porta serial do computador ao controlador. Para implementar o protocolo Modbus, utilizamos uma biblioteca disponível gratuitamente na Internet desenvolvida por um autor anônimo, a própria National Instruments disponibiliza gratuitamente uma biblioteca Modbus, mas apenas para versões do LabVIEW acima de 7.1.

O programa foi desenvolvido no LabVIEW 7 e tem a função de ler os dados nos registradores, plotar as informações em um gráfico para facilitar visualização do andamento durante a realização de cada experimento e escreve-las em um arquivo texto de modo que possam ser armazenadas para análise posterior. O tratamento dos sinais dos sensores é feito pelos controladores, sendo essa etapa transparente ao usuário. O programa é modular, cada módulo é capaz de realizar as atividades citadas para apenas um dispositivo escravo. Para utilização de mais dispositivos deve-se colocar no diagrama de blocos número de módulos igual ao número de dispositivos. Dentro da biblioteca retirada da Internet, utilizamos o Mbmaster.vi como sub-vi do programa de aquisição. Dentro desse vi os campos descritos na tabela 2.5 deveriam ser acessados e seu valor preenchido corretamente. O Mbmaster.vi permite que o computador faça o papel de mestre na comunicação entre os demais dispositivos.

Tabela 2.5 – Campos acessados no Mbmaster.vi

Campos que serão utilizados: Mbmaster.vi(front panel)	Valor	Descrição
Modbus Function	2	Com esse valor o programa implementa a função do protocolo Modbus 03-Read output registers.
Serial Port	Usuário	Diz para o computador qual porta serial esse deve acessar para se conectar com a rede RS-485.
Modbus Slave Address	Usuário	O endereço do dispositivo escravo.
Protocol Start Address	0	O número do registrador onde serão iniciadas as leituras dos valores requeridos
Number of points	2	Número de registradores que devem ser lidos a partir do registrador dado no Protocol Start Address.

O *front panel* bem como as explicações dos campos acessíveis ao usuário podem ser vistos na figura 2.18 e na tabela 2.6, respectivamente.

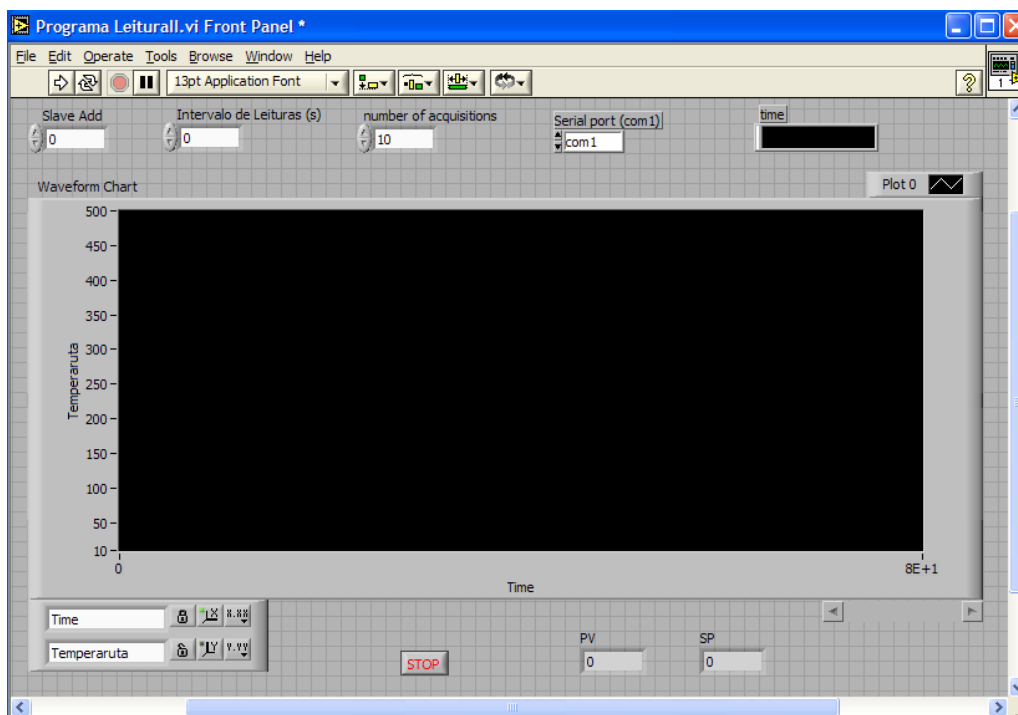


Figura 2.18 – Front Panel de um módulo do programa de aquisição de dados

Tabela 2.6 – Descrição dos campos disponíveis para o usuário

Campos disponíveis para o usuário do programa de aquisição	Tipo	Descrição
Slave Add	Entrada	O endereço do dispositivo escravo.
Intervalo de Leituras (s)	Entrada	Intervalo entre as leituras dos dados do dispositivo escravo.
Number of Acquisitions	Entrada	Número de aquisições que deverão ser feitas até o término do ensaio
Serial Port	Entrada	Porta do computador em que está conectada a rede RS-485
Timer	Saída	Hora do sistema operacional.
Waveform Chart	Saída	Gráfico dos dados coletados em função do tempo.
PV	Saída	Process Variable, valor real da variável de controle no momento última aquisição.
SP	Saída	Set Point, valor em que a variável de controle deveria se encontrar no momento da última aquisição.
Stop	Entrada	Botão de parada de emergência.

Resumindo o programa consiste de um laço que faz a aquisição do PV e do SP do sistema controlado, plota os valores no gráfico e os armazena em um arquivo texto a cada intervalo de leitura escolhido pelo usuário, até que o número desejado de aquisições seja atingido ou o botão de parada acionado. No entanto esse sistema apresenta alguns inconvenientes que deveriam ser ajustados caso esse programa seja utilizado como padrão do equipamento, o que não deve acontecer como será visto a seguir. O máximo de aquisições possíveis com esse sistema é 100, para o experimento de pirólise esse é um número muito pequeno. Além disso, seria interessante desvincular o número de aquisições do intervalo de leitura para um melhor acompanhamento do experimento.

Programa Delphi: O IBAMA recebeu a visita técnica do engenheiro do Cirad, Philippe Gallet, que chegou ao Brasil no segundo semestre de 2006 com o intuito de instalar um equipamento para estudo da torrefação da biomassa. Junto com os dispositivos necessários para instalação do novo sistema foi trazido o seu software de controle, desenvolvido pelo próprio Philippe. Por meio deste era possível fazer a aquisição dos dados via rede RS-485 utilizando o protocolo Modbus. Optou-se então por padronizar o sistema de aquisição de dados para facilitar a utilização dos dois equipamentos montados (reator de pirólise e câmara de torrefação) e assim proporcionar um desenvolvimento em conjunto do programa.

Delphi é uma linguagem de programação orientada a objetos, assim como em Java os objetos são instanciados por classes em Delphi são as unidades que os instanciam. Cada unidade possui atributos, que são suas características e métodos que tratam do comportamento desse objeto. Dentro de um programa essas unidades se comunicam através de mensagens, uma unidade não tem acesso a detalhes de outra.

Para desenvolvimento do software supervisor do reator de pirólise (figura 2.20) tomou-se como base o supervisor da câmara de torrefação (figura 2.19). Grande parte do código foi reaproveitado, essa é uma das vantagens de projetos orientados a objetos. Foi feita apenas a adição de uma unidade representando os controladores de temperatura e pressão do reator e a inserção dos métodos de acesso à essa unidade na classe que faz o gerenciamento dos dispositivos.

Não será feita uma abordagem profunda do código do programa desenvolvido, pois além de grande parte deste ter sido reutilizado e não desenvolvida durante o projeto, esse não é o foco do trabalho. Portanto, a abordagem escolhida foi voltada para visão do usuário, a descrição dos campos de acesso é vista na tabela 2.7. Ainda é preciso algumas alterações para o funcionamento pleno do novo sistema, o controlador da temperatura da válvula não implementa o protocolo Modbus como os demais e, portanto, ainda está inacessível por esse novo sistema. É necessário implementar o seu protocolo, ANSI no caso e, além disso, é preciso adquirir um módulo de aquisição de temperaturas que implemente o protocolo Modbus, pois no modelo atual não é possível fazer aquisição dos sinais de temperatura no interior do reator sem a utilização de uma segunda interface de aquisição de dados, por exemplo o linx.

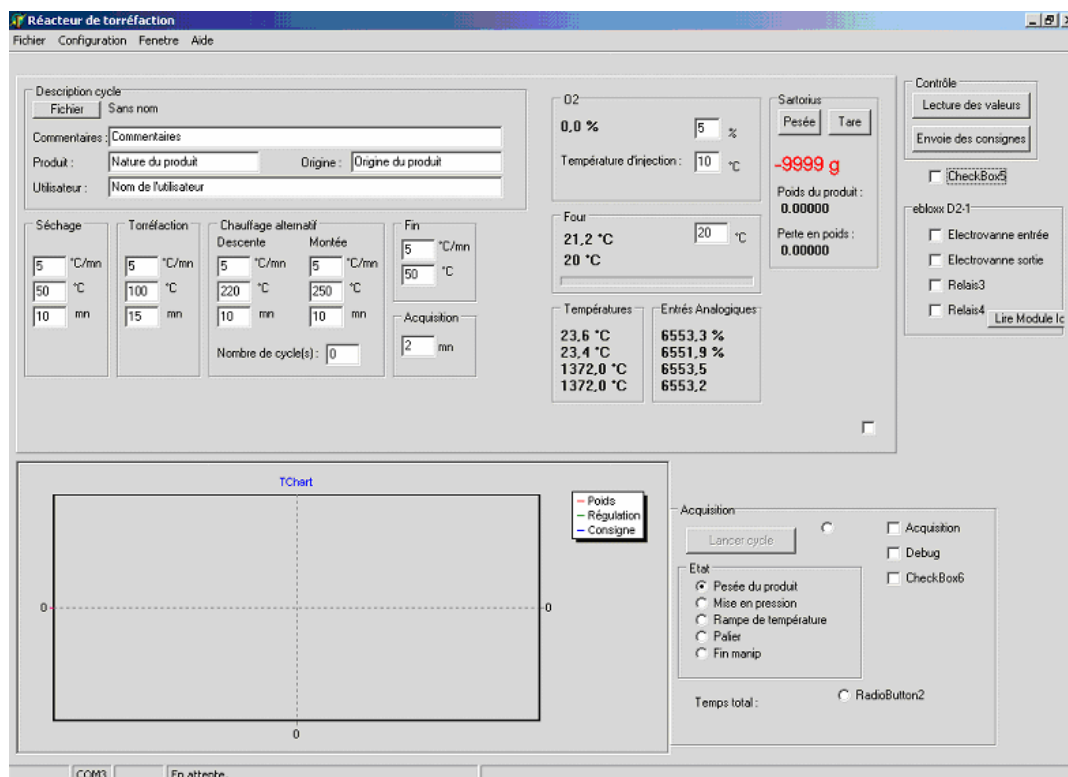


Figura 2.19 – Supervisor da câmara de torrefação

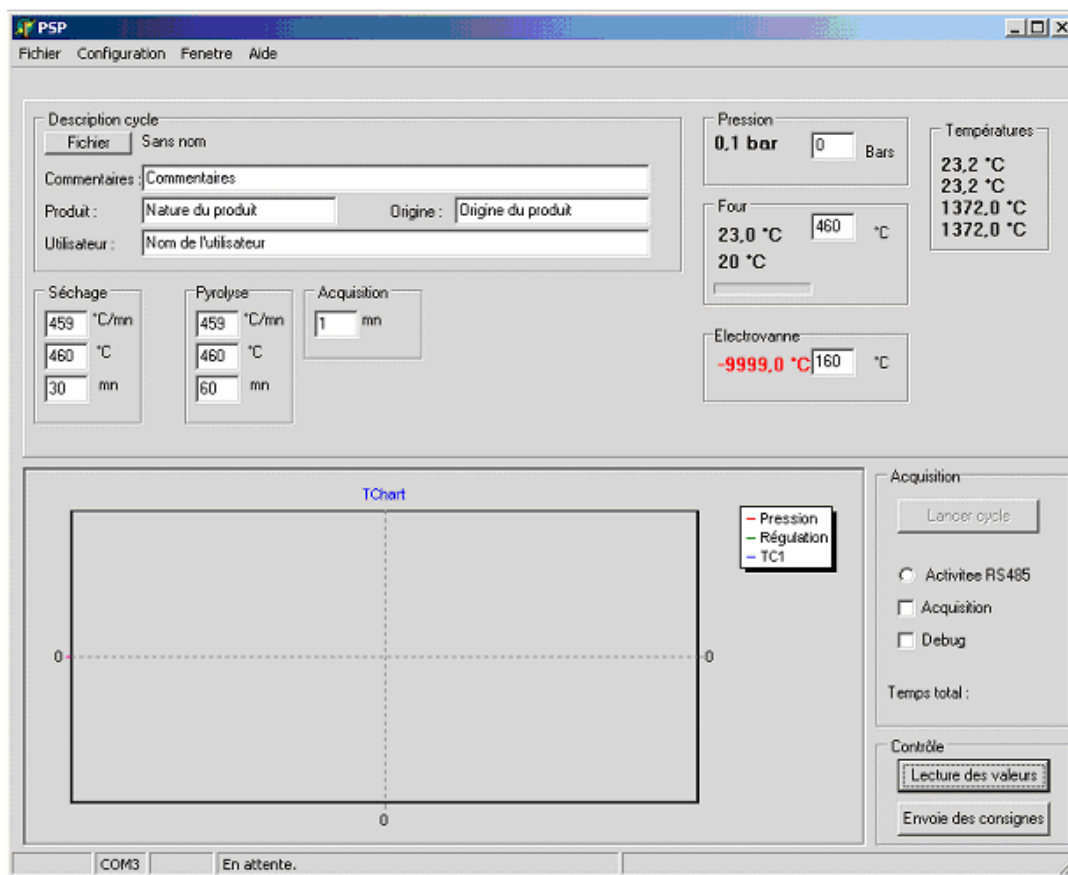


Figura 2.20 – Supervisório do reator de pirólise

Tabela 2.7 – Descrição dos campos de acesso pelo usuário do supervisório do reator de pirólise

Campo	Tipo	Descrição
Ficher	Entrada	Especifica o caminho em que deverá ser armazenado o relatório
Commentaires	Entrada	Comentários sobre o experimento serão adicionados ao cabeçalho do relatório gerado.
Produit	Entrada	Tipo de biomassa a ser carbonizada
Origem	Entrada	Origem da biomassa
Utilisateur	Entrada	Nome do usuário
Séchage oC/min	Entrada	Velocidade de aquecimento desejada até o patamar de secagem caso seja necessário
Séchage oC	Entrada	Temperatura do patamar de secagem
Séchage mn	Entrada	Duração do patamar secagem
Pyrolyse oC/min	Entrada	Velocidade de aquecimento desejada até o patamar de pirólise
Pyrolyse oC	Entrada	Temperatura do patamar de pirólise
Pyrolyse mn	Entrada	Duração do patamar pirólise
Pression	Entrada/Saída	Entrada: Valor do patamar de pressão Saída: Valor da variável do processo
Eletrovanne	Entrada/Saída	Entrada: Temperatura de aquecimento da válvula solenóide Saída: Valor da variável do processo
Tchart	Saída	Gráfico dos pontos adquiridos de temperatura e pressão em função do tempo
Temperatures	Saída	Temperaturas dos termopares do interior do forno
Lancer cycle	Entrada	Envia os dados do programa e inicia a aquisição
Acquisition mn	Entrada	Intervalo entre duas aquisições

2.4.5 CONTROLE

Como já foi dito anteriormente o controle do processo foi separado em duas malhas independentes: uma responsável pelo controle da temperatura e a segunda pela pressão. No sistema desenvolvido há ainda, uma terceira malha dedicada ao controle da temperatura da válvula solenóide. No entanto esta não influencia diretamente no produto final do processo e, apesar de ser importante para o funcionamento correto do equipamento, não será detalhada aqui. A figura 2.21 ilustra uma malha de controle genérica.

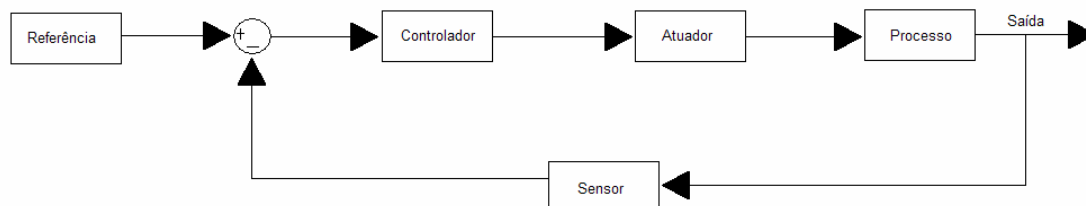


Figura 2.21 – Malha de controle genérica com realimentação negativa

O controle de todo o processo está concentrado em um painel (Figura 2.22), montado exclusivamente para o projeto. A planta de ligações elétricas do painel está anexada no fim do trabalho (A2). No coração da etapa de controle do processo estão os reguladores universais Novus N1100 (Figura 2.23), instrumentos que aceitam a maioria dos sensores utilizados na indústria e proporcionam diferentes tipos de saída, necessários à atuação em diversos processos. Dentre as suas características principais estão:

- Entrada universal multi-sensor, sem alteração do hardware;
- Saídas de controle tipo relé, 4-20mA e pulso (PWM);
- Auto-sintonia dos parâmetros PID;
- Comunicação serial RS-485, protocolo Modbus-RTU;
- Taxa de amostragem de 5 medições por segundo;
- Entradas calibradas de fábrica;
- 7 programas de 7 seguimentos concatenáveis;

A importância desse equipamento fica clara quando analisamos a figura 2.21. O regulador é capaz de gerar sua própria referência, faz o tratamento do sinal do sensor e implementa o controlador PID, podendo este ser auto-sintonizado ou realizado pelo usuário, gerando um sinal PWM para fazer o controle do processo.



Figura 2.22 – Painel de Controle



Figura 2.23 – Controlador Novus N1100

O uso do controle PID é amplamente difundido, sendo esta estratégia, juntamente com as suas possíveis variações, aplicada atualmente em mais da metade dos esquemas de controle industriais. A grande vantagem dos controladores PID, segundo Ogata, 2003 está na sua aplicabilidade. Quando o modelo matemático da planta não é conhecido, e, portanto, métodos de projeto de controladores analíticos não podem ser utilizados, o PID se mostra o mais versátil.

Como afirmado por Ang e Chong, 2005, o controlador PID pode ser considerado com uma forma extrema do compensador de atraso-avanço de fase com um pólo na origem e outro no infinito. A forma padrão do PID pode ser escrita de duas formas: na forma paralela (Equação 2.1) e na forma ideal (Equação 2.2),

$$G(s) = K_p + K_I \frac{1}{s} + K_D s \quad (2.1)$$

$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (2.2)$$

onde K_p é o ganho proporcional, o K_I ganho integral, o K_D ganho derivativo, T_I a constante de tempo integral e T_D a constante de tempo derivativa. A função de cada um dos três termos presentes nas duas equações anteriores pode ser separadas como:

- Termo proporcional P: fornece um controle proporcional do sinal de erro por meio de um fator de ganho passa tudo.
- Termo Integral I: reduz erros de regime por meio da compensação de baixa frequência pelo integrador.
- Termo Derivativo D: melhora a resposta transitória por meio da compensação de alta frequência do diferenciador.

No caso do controlador N1100 a equação do PID é implementada conforme a equação 2.3,

$$G(s) = \frac{100}{Pb} \left(1 + Ir \frac{1}{s} + Dts \right) \quad (2.3)$$

onde os termos Pb, Ir e Dt são parâmetros programados diretamente no dispositivo e podem ser facilmente relacionados com os termos K_p , T_I e T_D da equação 2.2.

Nos últimos anos a grande preocupação dos desenvolvedores de hardware de controle PID é com a sintonia dos seus parâmetro., Krisiansson e Lennartson, 2006, afirmam em seus eustudos que grande parte dos controladores instalados em plantas industriais são mal sintonizados, resultando em grandes prejuízos. Os reguladores N1100 apresentam sintonia automática dos parâmetros PID. A forma de cálculo desses parâmetros não é conhecida e na realidade existem vários modos de fazer esse cálculo. Acredita-se que nesse caso o regulador faça uma aproximação de segunda ordem do sistema e a partir desse modelo faça, de acordo com especificações internas, a definição dos parâmetros PID.

O ensaio para auto sintonia do N1100 consiste da aplicação de uma entrada em degrau ao sistema, com um patamar próximo ao de trabalho real da planta. Durante o ensaio o controlador funciona no modo ON-OFF, mantém a saída em máxima potência (ou nula se a atuação for reversa como no caso de um sistema de refrigeração) até que a variável do processo atinja o valor programado. Quando a saída é desligada o regulador espera até que o ponto de máximo sobre sinal (overshoot) para terminar a auto-sintonia. Com os parâmetros de tempo de subida e sobre sinal é possível traçar o modelo de segunda ordem facilmente, como pode ser visto no capítulo 5 do livro do autor Ogata, 2003, sendo M_p (máximo sobre sinal) equação 2.4 e t_r (tempo de subida) equação 2.5,

$$Mp = e^{-\left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)\pi} \quad (2.4)$$

$$tr = \frac{\pi - \tan^{-1}\left(\frac{\omega n \sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta \cdot \omega n}\right)}{\omega n \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2.5)$$

com os valor de máximo sobre sinal é possível isolar o valor do coeficiente de amortecimento do sistema ζ ($\zeta > 0$). Desse resultado pode-se obter na equação 2.5 do tempo de subida a frequência natural não amortecida ωn do sistema. De posse desses parâmetros basta inseri-los na equação 2.6, forma padrão do sistema de segunda ordem.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega n^2}{s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega n \cdot s + \omega n^2} \quad (2.6)$$

O controlador não atua diretamente sobre o sistema, mesmo porque não conseguiria fornecer a potência necessária. O controle é feito então através de um relé de estado sólido que é acionado por pulsos PWM ou Pulse Width Modulation (Modulação de Largura de Pulso). A geração desses pulsos é feita pelo próprio controlador e se dá da seguinte forma: o PID gera um sinal linear dentro de uma determinada faixa, essa onda é chamada modulante, o sinal gerado é comparado com o sinal da portadora, que pode ser uma dente de serra, e o resultado dessa comparação, no caso da figura 2.24 (enquanto modulante for maior que a portadora, tem-se o sinal PWM=1; já para modulante menor que a portadora, PWM=0), é que vai gerar pulsos de larguras diferentes. Esses pulsos irão ligar e desligar o relé de estado sólido repassando assim o sinal do atuador.

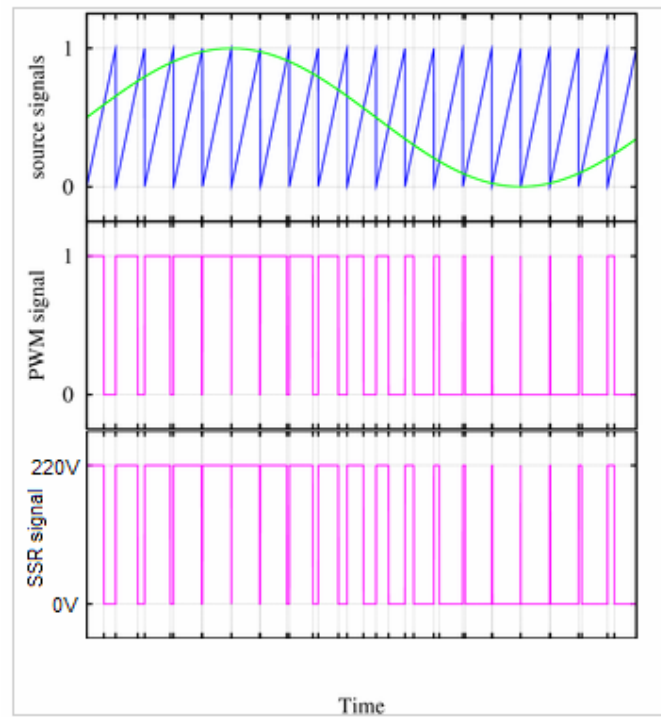


Figura 2.24 – Geração e propagação do sinal de PWM

Com isso a potência fornecida ao atuador será dada pelo valor médio do sinal PWM, que pode ser obtido através do cálculo do ciclo de trabalho dado pela equação 2.7,

$$D(t) = \frac{\tau(t)}{T} \cdot 100\% \quad (2.7)$$

onde $\tau(t)$ é o período que depende do sinal modulante, T é o período constante. No caso do sistema implantado um ciclo de trabalho de 50%, por exemplo, corresponde a 50% da potência possível fornecida ao sistema, pois o valor de saída para os atuadores do processo vai de 0 a 220V.

Os relés de estado sólido (Solid State Relays – SSR) foram escolhidos como atuadores elétricos do sistema por apresentarem grandes vantagens em relação aos relés mecânicos: não possuem partes mecânicas, aumentando assim sua vida útil e diminuindo o tempo de resposta, além de não produzirem faiscamento e necessitarem de baixa potência de acionamento. Os relés foram adquiridos junto à Novus, mesma fabricante dos reguladores (Figura 2.25).



Figura 2.25 – Relé de Estado Sólido Novus

Conhecidas as estratégias de controle adotadas para o processo, faremos agora uma análise separada de cada uma das duas malhas de controle implementadas.

Controle de Temperatura: A malha de controle de temperatura segue o esquema da figura 2.26, onde a temperatura de controle do processo é medida pelo termopar tipo K. O controlador compara essa temperatura com a programada e define a potência a ser fornecida para o atuador do processo, no caso a resistência do forno de aquecimento.

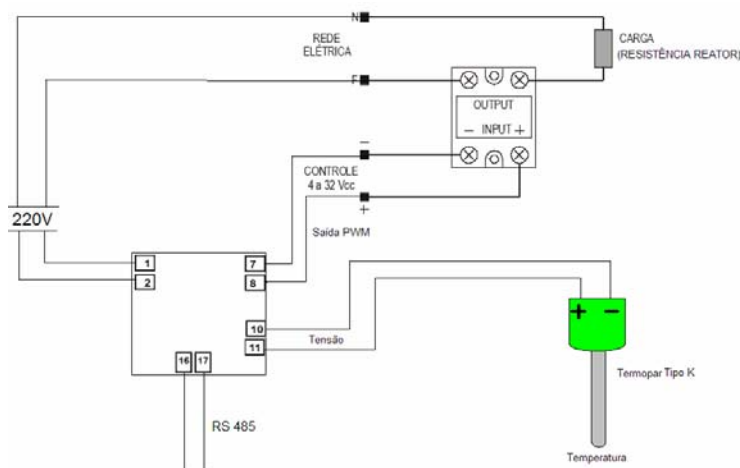


Figura 2.26 – Malha de controle de temperatura

Inicialmente a temperatura controlada era a do contato do forno com o copo do reator e o controle ON-OFF já apresentava um bom desempenho e as pequenas variações de temperatura não tinham influência sobre o processo. Isso foi definido, pois no reator francês essa era a estratégia adotada. No entanto, esta estratégia traz alguns desconfortos, pois não se pode ter certeza da temperatura que será atingida no interior do reator durante o processo. Para tentar contornar, foram feitos alguns ensaios para estudo da possibilidade de transferir o controle de temperatura para o interior do reator. O termopar posicionado no centro do copo forneceria a temperatura de controle.

A série de ensaios começou com a auto-sintonia dos parâmetros PID - nesse primeiro, portanto, o controle foi ON-OFF. Podemos ver na figura 2.27 o comportamento da temperatura e na figura 2.28 fica clara a grande oscilação da temperatura no interior do reator, indesejável para o processo. Pode-se observar, também, que não há problema quanto aos limites do equipamento, pois a temperatura na resistência nesse que é o teste crítico não ultrapassa os 535°C. Na tabela 2.8 estão contabilizados os principais critérios de desempenho do processo.

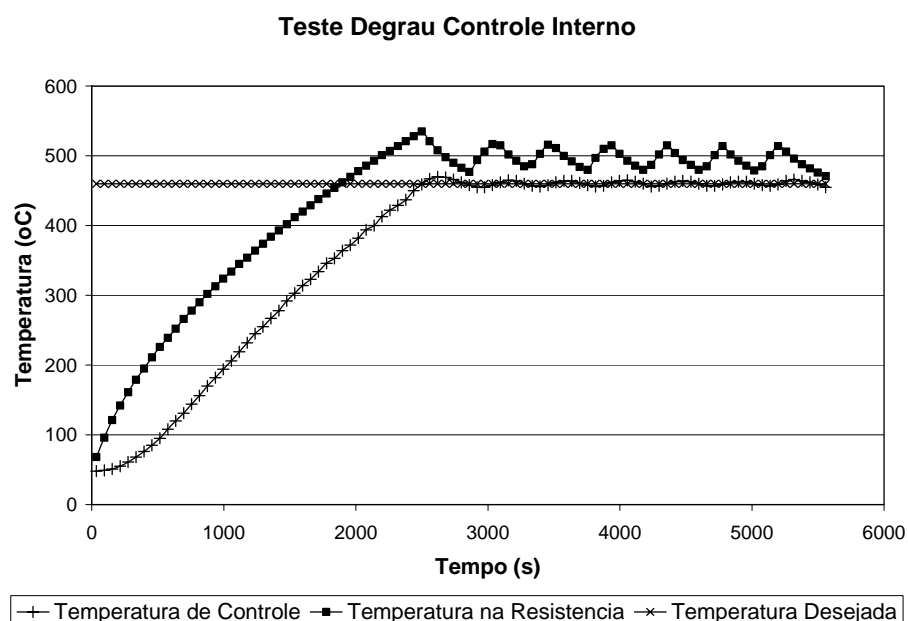


Figura 2.27 – Auto-Sintonia dos parâmetros PID

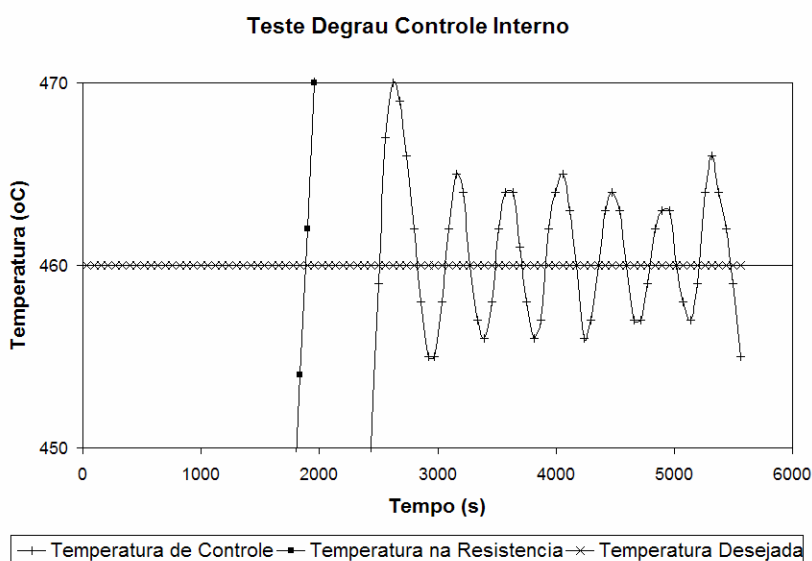


Figura 2.28 – Auto-sintonia dos parâmetros PID Ampliado

Tabela 2.8 – Desempenho do Controle do primeiro ensaio com controle interno

Critério de Desempenho	Valor
Tempo de Subida	2559s
Máximo Sobre Sinal	10oC
Tempo de Acomodação	indeterminado

O resultado da auto-sintonia foi utilizado para realização de um segundo ensaio - o gráfico da evolução desse ensaio pode ser visto na figura 2.29. Os parâmetros PID, no formato aceito pelo controlador da Novus, estão na tabela 2.9 e o desempenho pode ser analisado pelos dados da tabela 2.10. Analisando o resultado do ensaio percebe-se o término das oscilações de temperatura - no entanto, o tempo de subida aumentou consideravelmente.

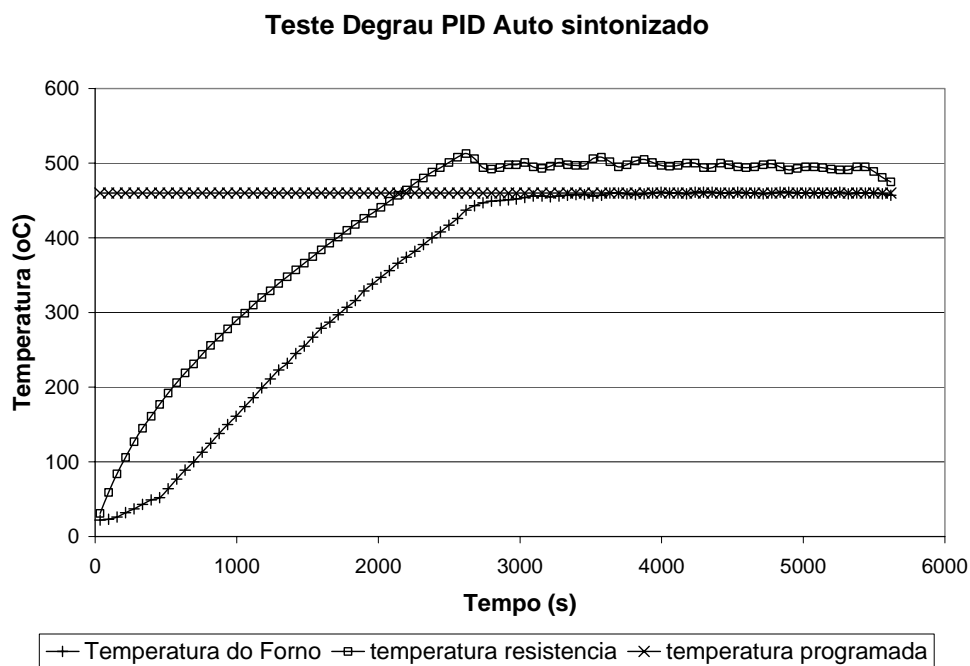


Figura 2.29 – PID auto-sintonizado

Tabela 2.9 – Parâmetros do controlador PID do segundo ensaio com controle interno

Parâmetro	Valor
Pd	1
Ir	0,07
Dt	168

Tabela 2.10 - Desempenho do controle do segundo ensaio com controle interno

Critério de Desempenho	Valor
Tempo de Subida	3000s
Máximo Sobre Sinal	0oC
Tempo de Acomodação	3000s

Seguindo as orientações do fabricante e de tabelas de ajuste fino proposta pelos autores Ang e Chong, 2005, e Li, Ang e Chong, 2006, foi realizado um segundo ensaio buscando aperfeiçoar o controle. O gráfico do desempenho do ajuste fino proposto pode ser visto na figura 2.30. A contabilização dos critérios de desempenho é apresentada na tabela 2.11 e os parâmetros do PID proposto, na tabela 2.12. Com o ajuste fino, procurou-se reduzir o tempo de subida, mesmo que isso acarretasse em um pequeno sobre sinal, como pode ser observado.

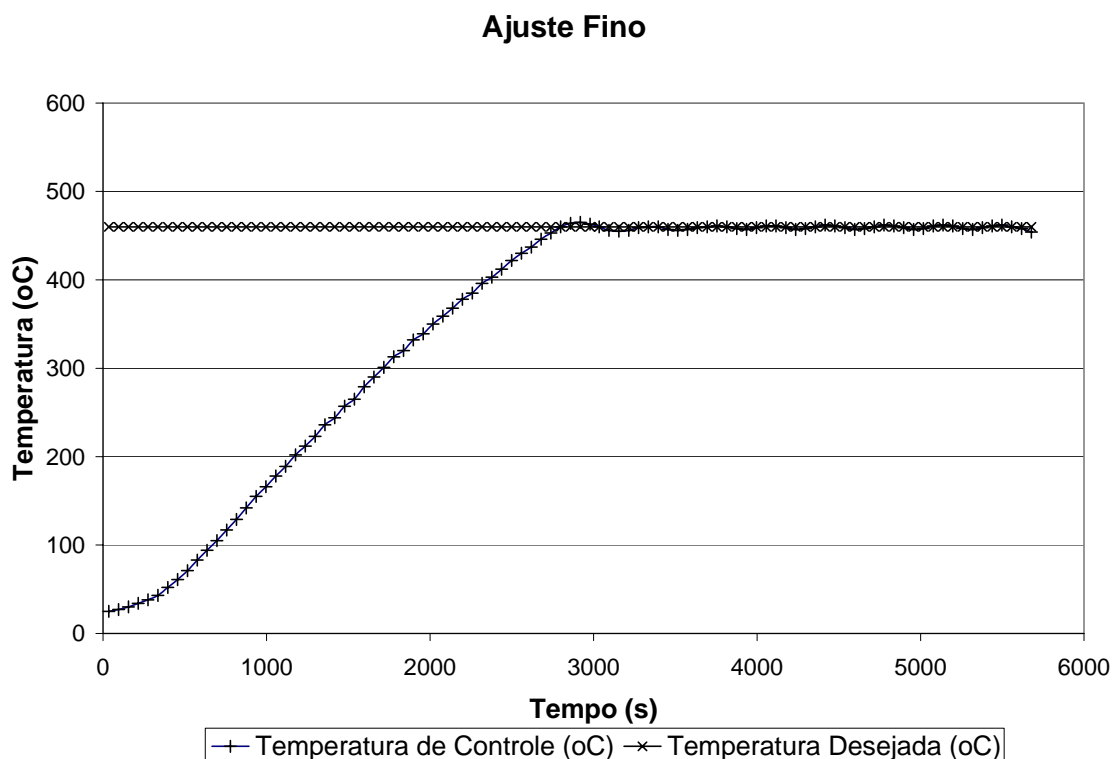


Figura 2.30 – Ajuste fino

Tabela 2.11 - Parâmetros do controlador PID do terceiro ensaio com controle interno

Parâmetro	Valor
Pd	0,3
Ir	0,17
Dt	13

Tabela 2.12 - Desempenho do controle do terceiro ensaio com controle interno

Critério de Desempenho	Valor
Tempo de Subida	2799s
Máximo Sobre Sinal	10oC
Tempo de Acomodação	3200s

Por meio desses ensaios ficou claro que a transferência do controle para o termopar no interior do reator é plenamente possível e deve ser implementada já para os próximos experimentos. Entretanto, existe um trade-off implícito em todas as estratégias de controle - deve-se fazer a opção por uma resposta mais lenta do sistema, porém mais precisa ou uma resposta mais rápida, mas que pode gerar oscilações.

Controle da Pressão: A malha de controle de pressão segue o esquema da figura 2.31, onde a pressão do processo é medida pelo transmissor de pressão TP-510 da Huba Control. O controlador compara o valor medido com o programado e define a potência a ser fornecida para o atuador do processo, no caso a válvula de controle.

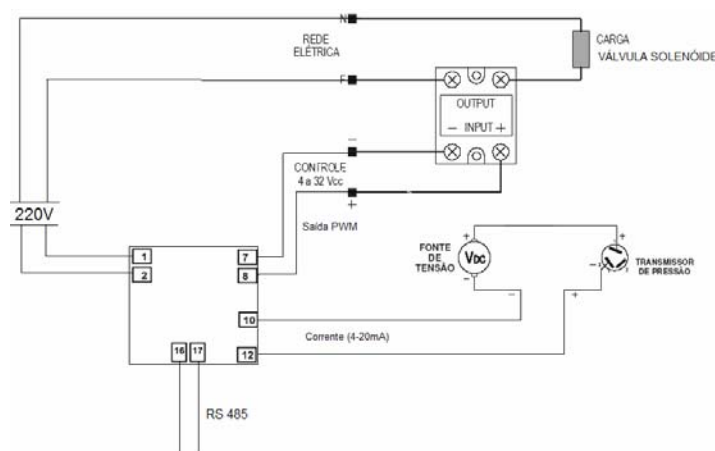


Figura 2.31 – Malha de controle de pressão

Assim como no caso do controle da temperatura, inicialmente o controle da pressão também era ON-OFF, mas ao contrário deste, para o caso da pressão, essa estratégia nunca se mostrou eficiente. Isso porque o controlador N1100 implementa o controle digital e como é afirmado pelo autor Franklin, 1998, o único impacto de grande importância na implementação de um sistema de controle digital é o atraso provocado pela amostragem. O atraso em qualquer sistema realimentado degrada a estabilidade do processo. Devido a esse fato, durante o controle ON-OFF, após um evento de abertura da válvula o controlador esperava até a próxima amostragem para fechá-la, o que levava a uma vazão de gases maior que a necessária - a pressão do reator é mantida constante pelo regulador de pressão, no entanto, o fluxo de gases aumenta influenciando no rendimento do processo, como foi dito na introdução. O efeito do tempo de amostragem não é importante no controle da temperatura, pois a constante de tempo da planta é muito elevada.

Esse problema poderia ser contornado por uma estratégia de controle adequada. Por isso, através de alguns testes com o equipamento disponível, chegamos a um controle PI que, como iremos observar nas figuras 2.32 e 2.33, mostram as respostas com e sem o controle PI - demonstram a evolução do desempenho do controle. O ensaio de auto-sintonia da pressão não pôde ser realizado devido à dificuldade da criação do degrau de pressão. Para facilitar a observação do desempenho de cada uma das duas estratégias de controle foi feito um ensaio em que a pressão no interior do reator deveria acompanhar uma rampa de descompressão. Os valores dos três parâmetros PID podem ser vistos na tabela 2.13.

Tabela 2.13 – Parâmetros PID para controle da pressão

Parâmetro	Valor
Pd	2
Ir	24
Dt	0

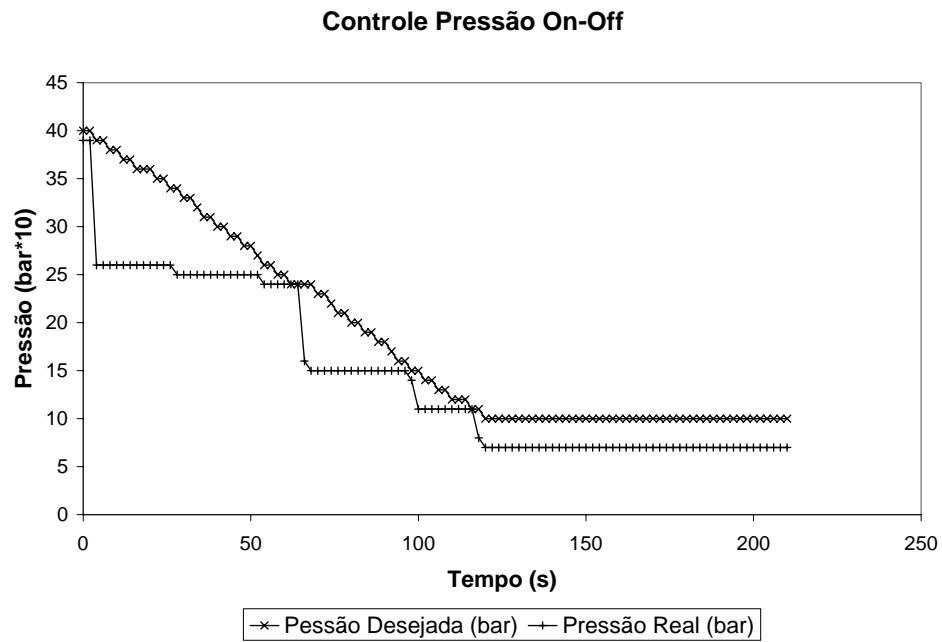


Figura 2.32 – Controle pressão ON-OFF

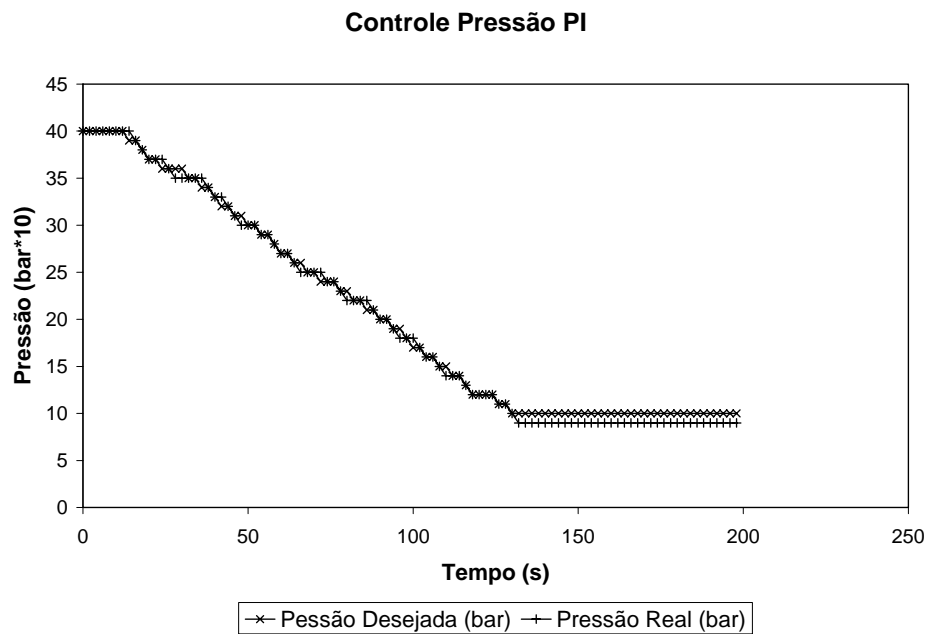


Figura 2.33 – Controle pressão PI

Comparando os dois gráficos acima, fica clara a melhoria da resposta do sistema. Com isso encerramos a etapa de controle. No próximo capítulo serão apresentados os ensaios realizados para aperfeiçoar o equipamento desenvolvido e em seguida os resultados dos experimentos com todo o sistema já implementado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresentadas todas as etapas de construção do novo sistema, resta agora analisar o seu comportamento durante o processo de pirólise. Neste capítulo serão mostrados e discutidos os experimentos realizados durante o desenvolvimento do equipamento.

3.1 DESCRIÇÃO DA TECNOLOGIA DESENVOLVIDA

Como pôde ser observado durante a descrição do desenvolvimento do equipamento, no capítulo anterior, a tecnologia desenvolvida seguiu o escopo proposto inicialmente na figura 2.2. Uma visualização mais detalhada do sistema implementado pode ser observada na figura 3.1 a seguir. Como pode-se ver, o sistema cumpre com todos os requisitos propostos, contudo, comparando o esquema da figura 2.2 com o da figura 3.1, esta apresenta com detalhes o equipamento desenvolvido.

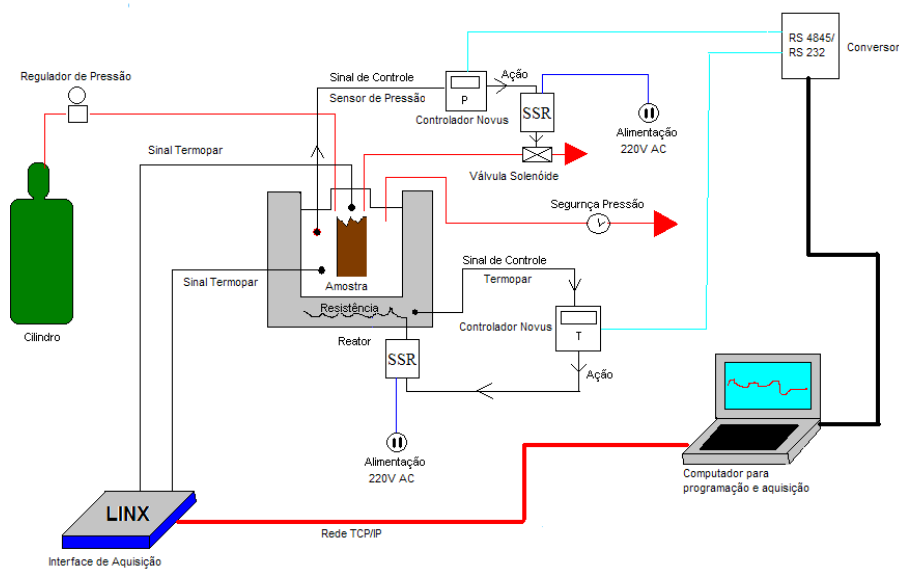


Figura 3.1 – Esquema do Sistema Desenvolvido

O cilindro de nitrogênio fornece a pressão e a atmosfera inerte no interior do reator. O aquecimento do sistema é feito pela resistência do forno. O controle das duas variáveis do processo é feito por controladores Novus N1100. A aquisição dos dados dos sensores das variáveis do processo é feita pelo barramento RS-485, já a aquisição dos demais sensores de acompanhamento da evolução do experimento é feita pela interface de aquisição Linx, conectada via rede no computador. Os atuadores elétricos do sistema são relés de estado sólido, já os atuadores do processo são a válvula solenóide Jefferson e a resistência do forno de aquecimento.

A integração de todo sistema é responsabilidade de uma camada do processo responsável pela comunicação e está presente em todos os níveis da planta. Os sensores e atuadores do processo se comunicam com os controladores e estes, por sua vez, se comunicam com o computador. O grau de complexidade no tratamento das informações e a versatilidade aumentam quanto mais alto estiver o dispositivo na pirâmide da figura 3.2.

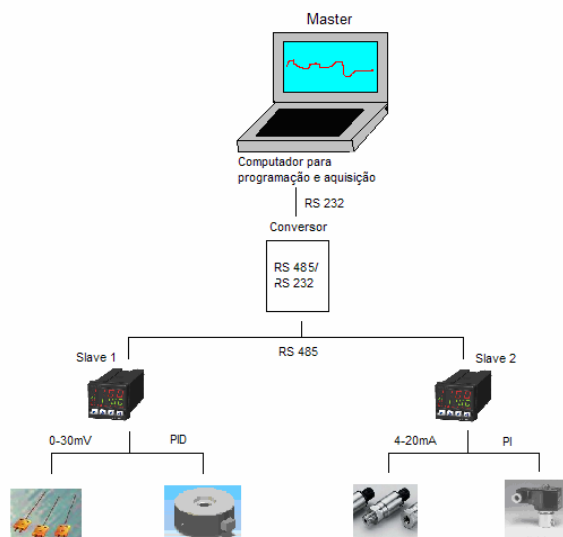


Figura 3.2 – Hierarquia da comunicação do processo

3.2 EXPERIMENTOS

No total foram realizados vinte e três ensaios para avaliar o funcionamento do equipamento, sendo: cinco ajustes realizados durante o desenvolvimento do novo sistema para detecção de possíveis problemas; nove experimentos de torrefação de briquetes; e outros nove experimentos para avaliar o sistema em diferentes configurações de operação, propiciando assim ajustes finais do equipamento. Os ensaios realizados serão analisados aqui do ponto de vista do processo, dando pouca atenção a detalhes no preparo de amostras, na definição dos planos de experimento ou na análise do carvão, cabendo essa análise ao engenheiro florestal.

Cada experimento tem duração de aproximadamente seis horas e devido ao tempo necessário para resfriamento do sistema não é possível a realização de mais de um ensaio por dia. Portanto, era preciso extrair o máximo de informações de cada ensaio.

3.2.1 ENSAIOS DE AJUSTE

Ao todo foram realizados cinco experimentos de ajuste do equipamento, sendo que os dados do quarto foram perdidos devido a problemas com o ALMEMO. Os três primeiros tiveram seus dados colhidos manualmente e no quinto experimento foi utilizada a placa de aquisição ADS0500 da Linx - os gráficos da evolução dos ensaios são apresentados a seguir nas figuras 3.3 a 3.6. Os experimentos foram realizados com controle ON-OFF de temperatura na resistência do forno e de controle ON-OFF de pressão.

Analisando a evolução de cada um dos ensaios de ajuste pode-se acompanhar os primeiros passos de desenvolvimento do equipamento. No primeiro experimento percebe-se uma grande oscilação do patamar de pressão, mantida mais constante no segundo e terceiro ensaios. Isso se deu devido ao fato de que nos dois últimos o regulador de pressão era mantido aberto durante todo o experimento. Pode-se observar também que os três ensaios foram feitos com diferentes patamares de temperatura para avaliar a relação entre as temperaturas internas e de controle. Uma terceira curva de temperatura surge no gráfico do terceiro ajuste, mostrando a temperatura interna da madeira durante o processo. Entretanto, no quinto ensaio esse termopar passa a adquirir os dados de temperatura do ar da região superior do copo. Esse foi o terceiro e último termopar adicionado ao processo. No quinto ajuste o programa de aquecimento é o mesmo do terceiro, contudo, percebe-se uma aproximação significativa da temperatura interna do reator e da temperatura de controle, isso porque neste ensaio o sistema de isolamento térmico já estava sendo utilizado - o gráfico comparando os ajustes cinco e três pode ser visto na figura 2.9 do capítulo anterior.

Evolução do Ajuste 1

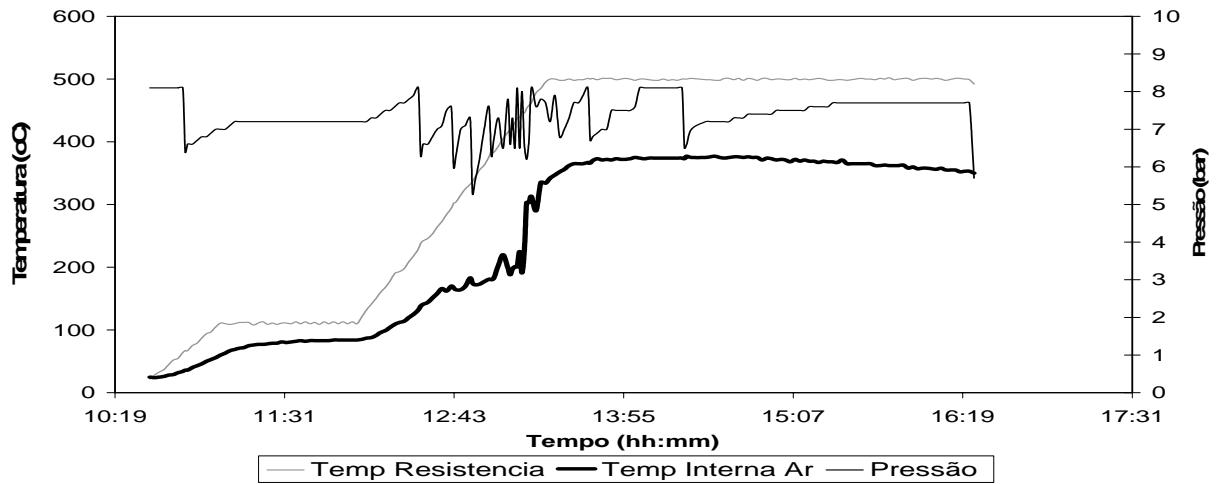


Figura 3.3 – Gráfico da evolução do ajuste 1

Evolução do Ajuste 2

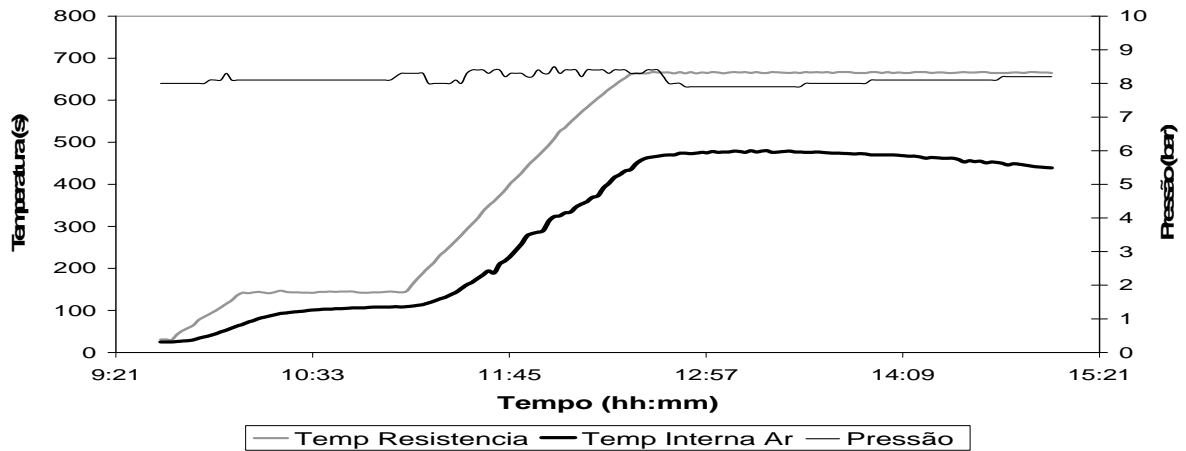


Figura 3.4 – Gráfico da evolução do ajuste 2

Evolução do Ajuste 3

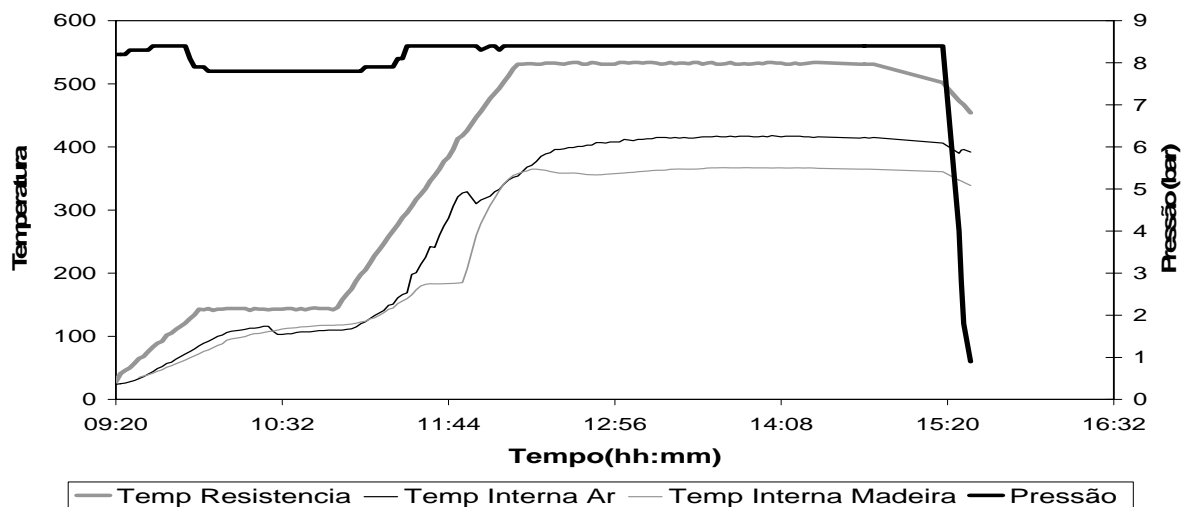


Figura 3.5 – Gráfico da evolução do ajuste 3

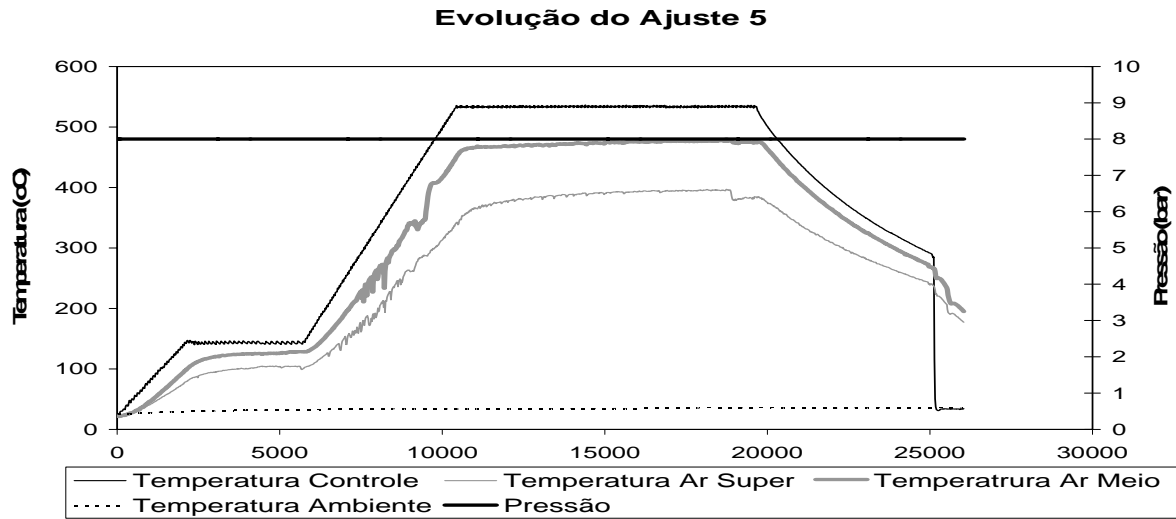


Figura 3.6 – Gráfico de evolução do ajuste 5



Figura 3.7 – Fotos do carvão e corpos de prova dos experimentos de ajuste

A figura 3.7 acima trás as imagens dos corpos de prova antes e após o processo de pirólise. Na primeira coluna está o carvão produzido e os respectivos corpos de prova utilizados nos três primeiros ajustes. Na segunda coluna o carvão produzido nos dois últimos e na terceira os tipos de corpos de prova testados durante os experimentos de ajuste.

Completada a série de ajustes do equipamento foi feita a análise imediata do carvão resultante de cada um dos ensaios. Assim foi possível definir alguns parâmetros dos próximos experimentos a serem realizados: os corpos de prova seriam cubos de 2x2x2cm como o cubo maior ilustrado na foto superior da terceira coluna da figura 3.7 e a temperatura interna do reator deveria estar próxima da alcançada

no terceiro ajuste. As tabelas contendo os resultados da análise imediata estão anexados no fim deste relatório.

3.2.2 ENSAIOS DE TORREFAÇÃO

Todos os nove ensaios de torrefação foram feitos entre os ajustes 4 e 5. Esses ensaios faziam parte do plano de trabalho do projeto de iniciação científica de uma estudante de agronomia e acabaram sendo também de grande utilidade para a evolução do equipamento. A torrefação é um processo de degradação térmica realizado a temperaturas inferiores à da pirólise, 200 à 250°C. Foram torreficados resíduos densificados (briquetes) e esse processo se mostrou extremamente agressivo ao equipamento. A grande quantidade de alcatrão liberada já nos primeiros ensaios prejudicou o funcionamento da válvula de controle. Com isso, verificou-se a necessidade de impedir a sua condensação até que este passasse pela válvula. Os gráficos da evolução de alguns dos ensaios de torrefação são apresentados a seguir nas figuras 3.8 a 3.12 - nem todos são apresentados, pois alguns dos experimentos não foram bem sucedidos devido à agressividade do processo.

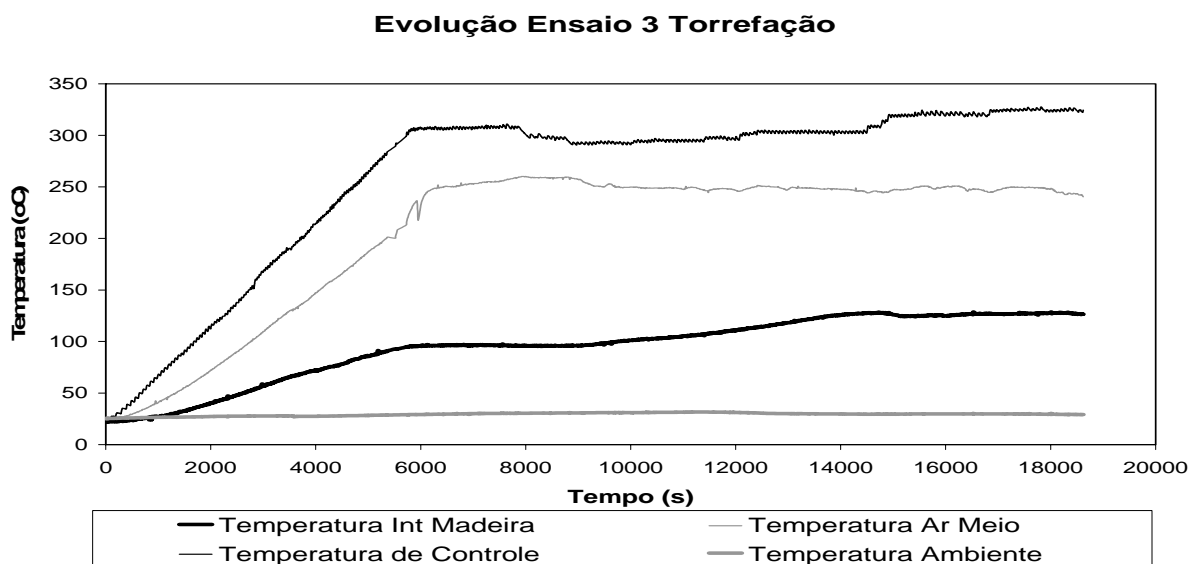


Figura 3.8 - Evolução do terceiro ensaio de torrefação

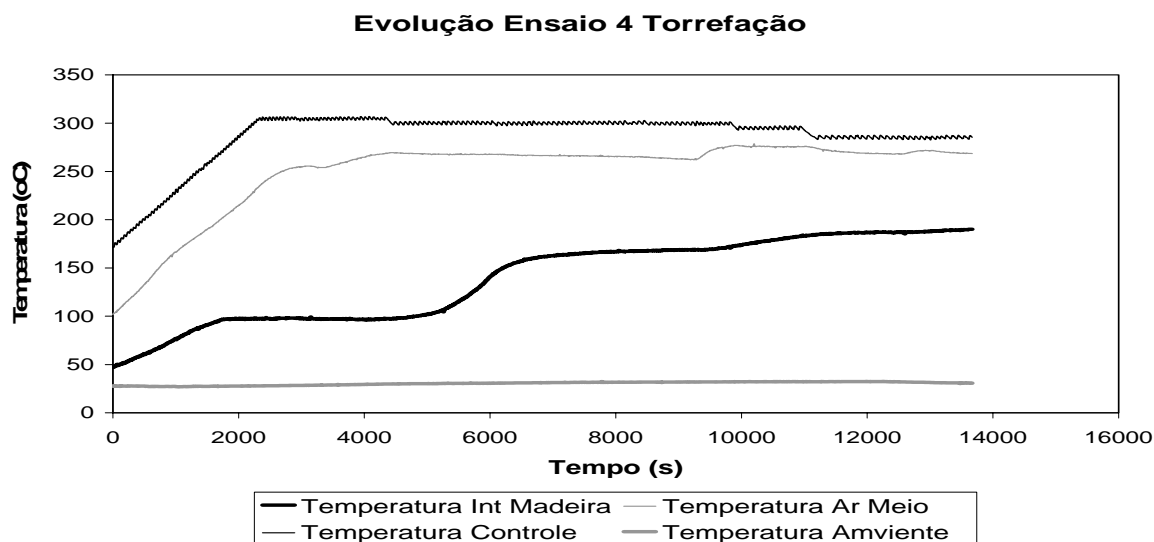


Figura 3.9 - Evolução do quarto ensaio de torrefação

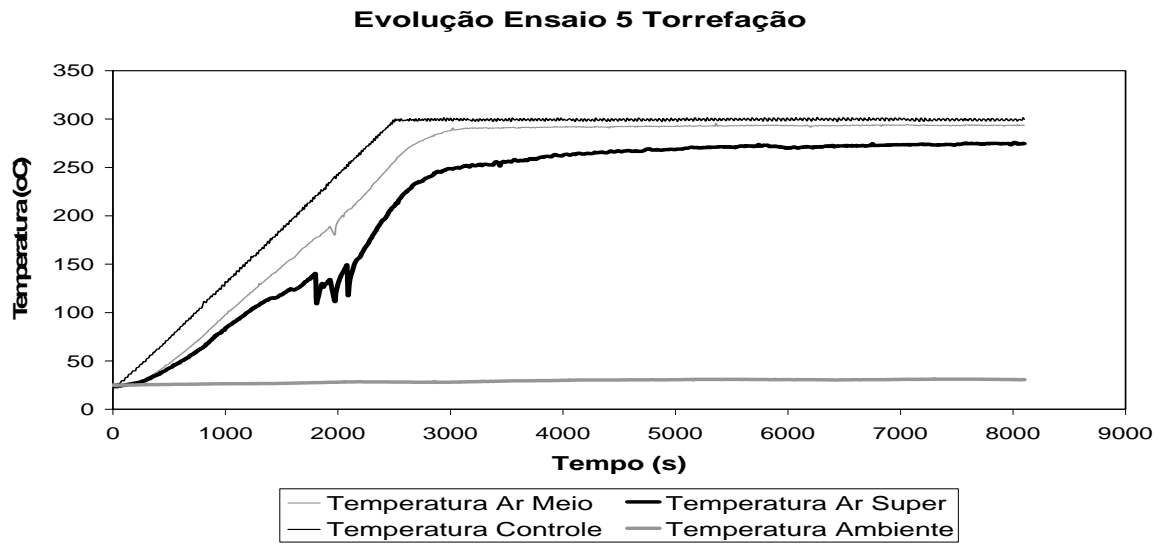


Figura 3.10 - Evolução do quinto ensaio de torrefação

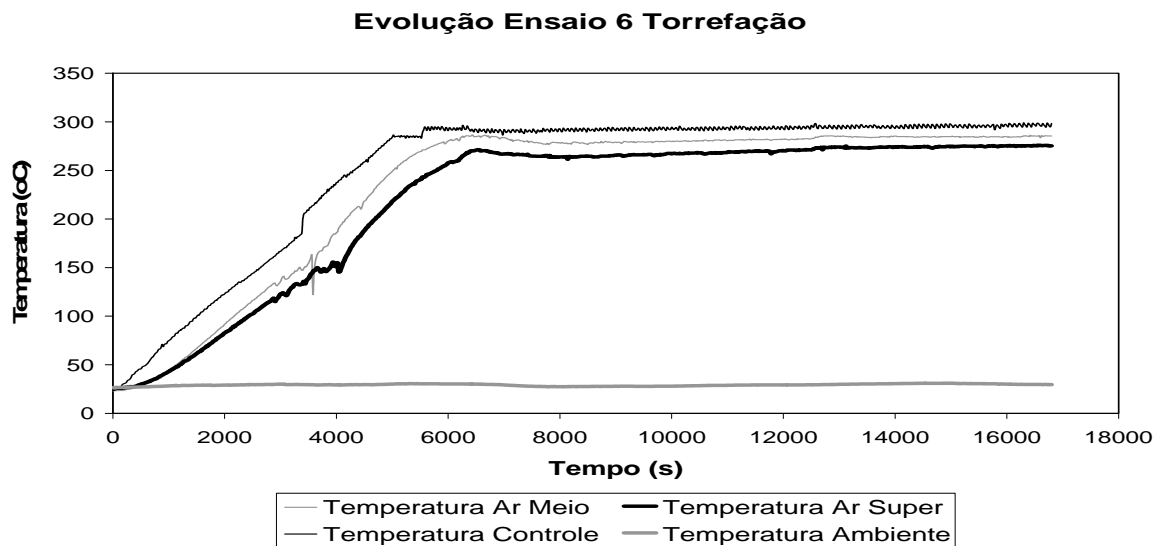


Figura 3.11 - Evolução do sexto ensaio de torrefação

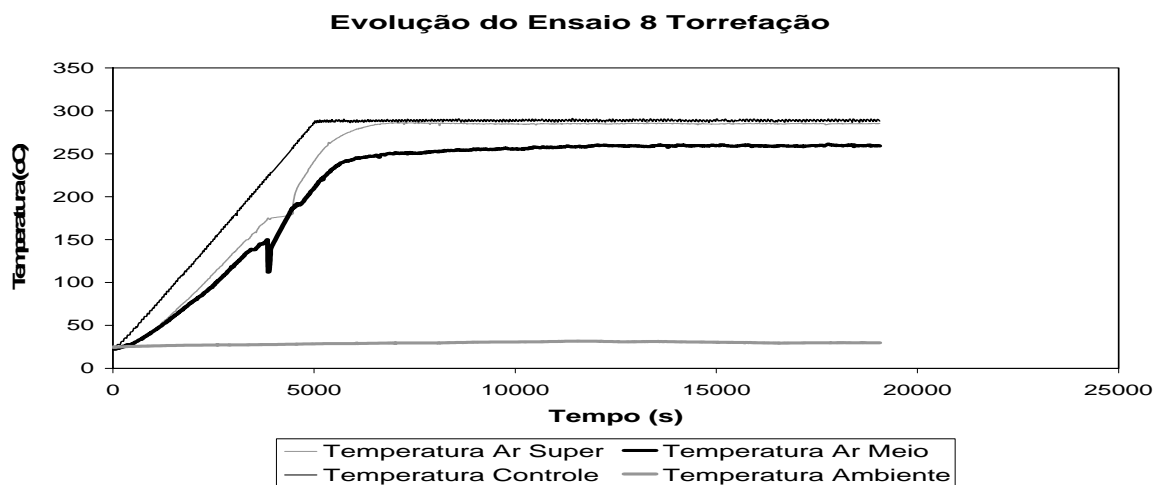


Figura 3.12 - Evolução do oitavo ensaio de torrefação

Analisando a evolução de cada experimento pode-se verificar mais alguns passos no desenvolvimento do sistema. No gráfico da figura 3.8 percebe-se que a temperatura interna do briquete não vai muito além do patamar de secagem, que é cerca de 110°C, não atingindo assim o patamar de torrefação. Cabe aqui observar que a temperatura interna do briquete foi medida no briquete posicionado mais ao alto do reator - quando o reator era descarregado ficava claro um gradiente térmico no seu interior, com os briquetes posicionados ao fundo do reator perfeitamente torreficados enquanto que os posicionados na parte superior haviam apenas absorvido a umidade liberada pelos inferiores, inchando e não apresentando nenhuma degradação sofrida. Conhecido o problema, restava encontrar sua causa, apontada como sendo a troca de calor que estava sujeita a tampa do reator, tanto com a mesa quanto com o ar. No experimento seguinte, ilustrado pela figura 3.9, a tampa foi coberta com uma camada de lã de vidro, material isolante. Observou-se então um considerável aumento da temperatura no interior da madeira.

Essa simples ação de cobrir a tampa com lã de vidro indicou o caminho a ser seguido. A partir daí foi projetada e montada a camada isolante citada no capítulo anterior. Nos ensaios seguintes, apesar não mais ser utilizada a temperatura interna do briquete como referência, fica claro que a temperatura na parte superior do reator está suficientemente elevada para o processo de torrefação.

3.2.3 ENSAIOS FINAIS

Nos últimos nove ensaios realizados o equipamento já estava amadurecido, com praticamente todas as etapas de desenvolvimento citadas no capítulo 2 concluídas, exceto quanto à implementação do controle de temperatura interno, do controle PI para válvula solenóide e do programa supervisor em Delphi. Nesses experimentos buscou-se verificar o comportamento do sistema em diferentes condições de operação (sem pressão, com pressão com reposição de nitrogênio e com pressão sem reposição de nitrogênio). Foram realizados três experimentos para cada configuração proposta, todas com o mesmo programa de aquecimento.

A evolução dos experimentos finais realizados, bem como as imagens do carvão produzido, são apresentados a seguir, nas figuras 3.13 a 3.24.

Com pressão e com reposição:

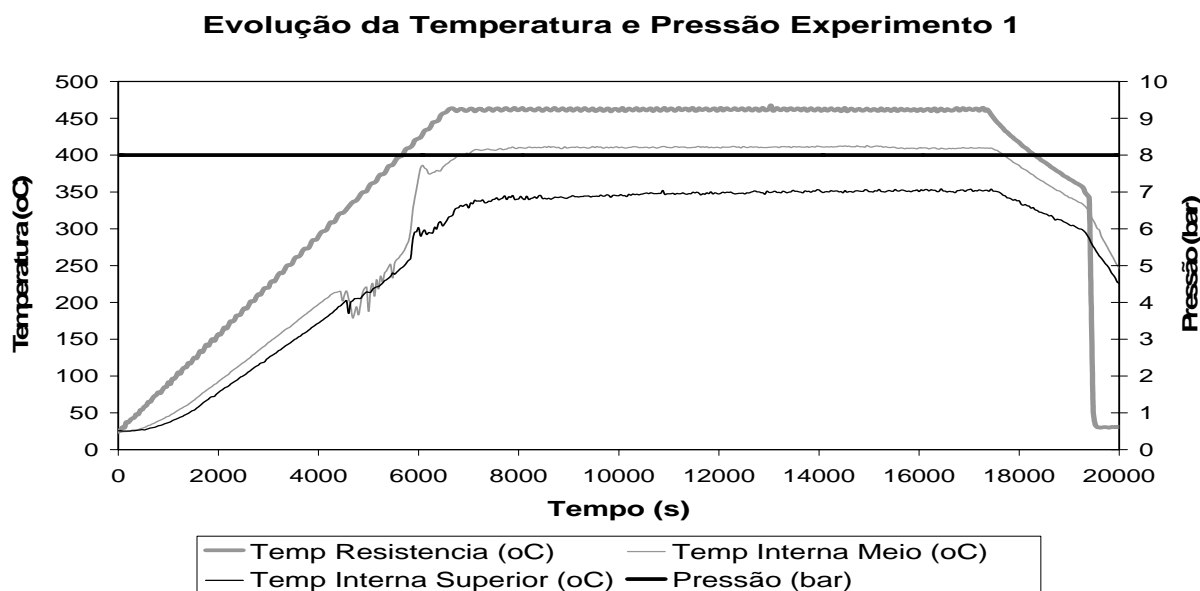


Figura 3.13 – Evolução da temperatura e pressão do experimento 1

Evolução da Temperatura e Pressão Experimento 2

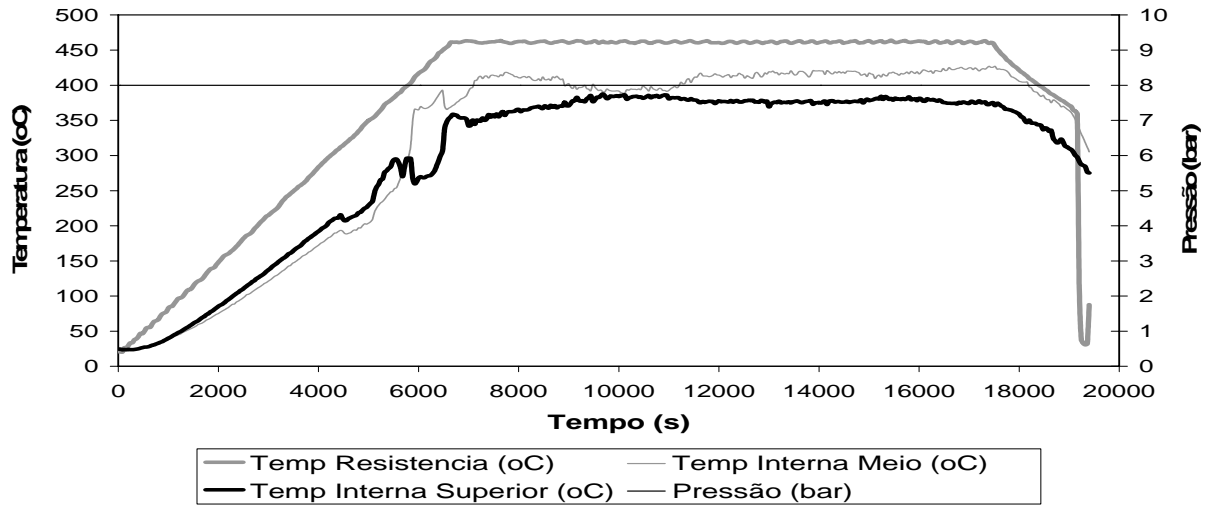


Figura 3.14 – Evolução da temperatura e pressão do experimento 2

Evolução da Temperatura e Pressão Experimento 3

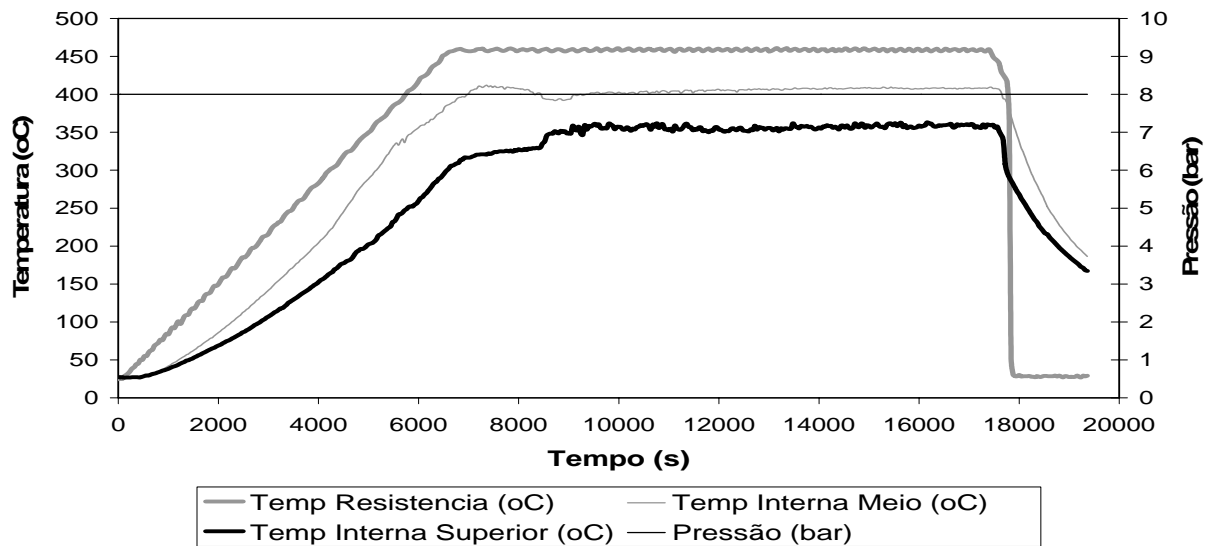


Figura 3.15 – Evolução da temperatura e pressão do experimento 3



Figura 3.16 – Carvão produzido no a) primeiro ensaio b) segundo ensaio c) terceiro ensaio
Com pressão e sem reposição:

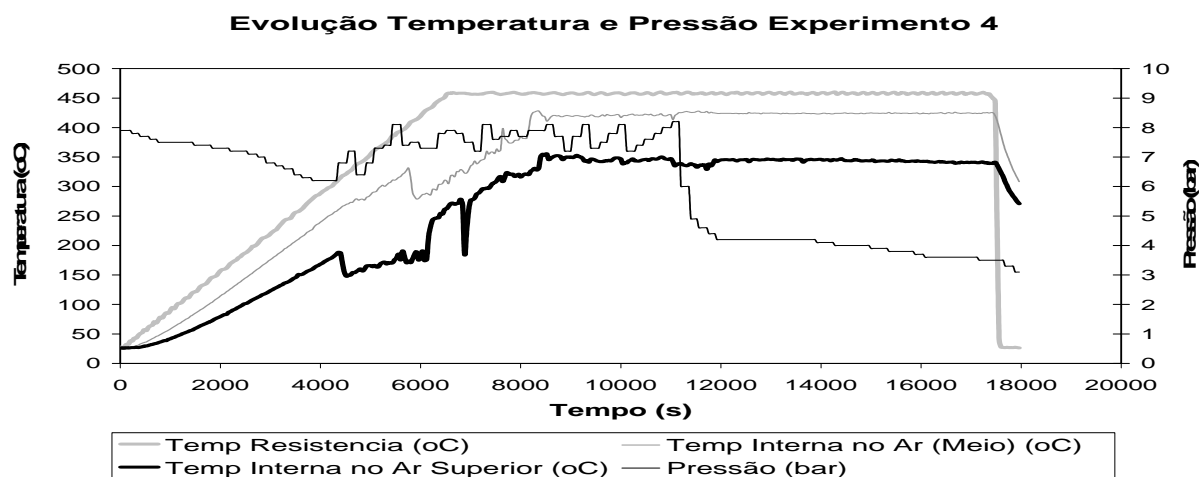


Figura 3.17 – Evolução da temperatura e pressão do experimento 4

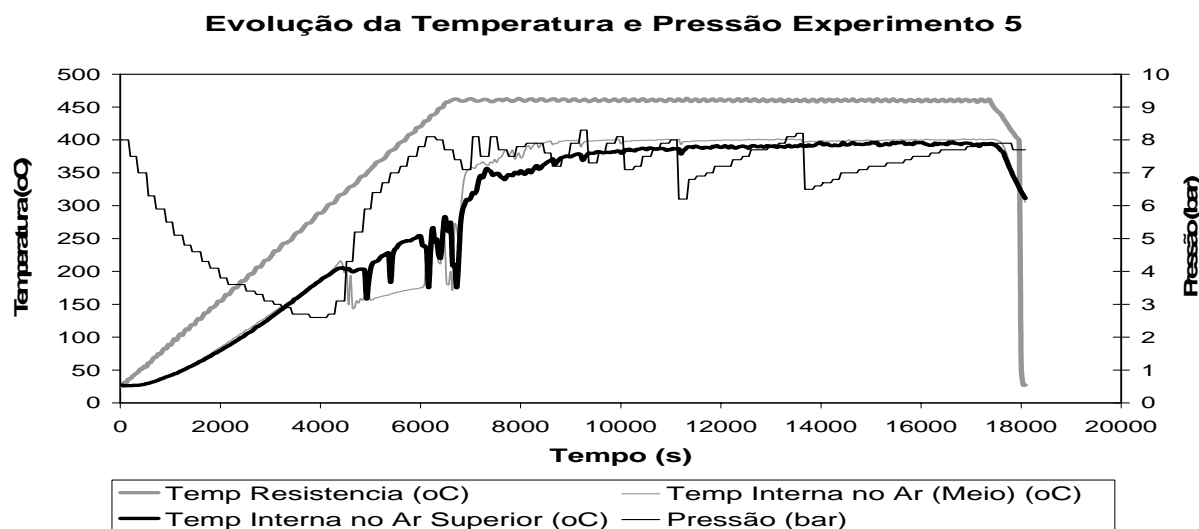


Figura 3.18 – Evolução da temperatura e pressão do experimento 5

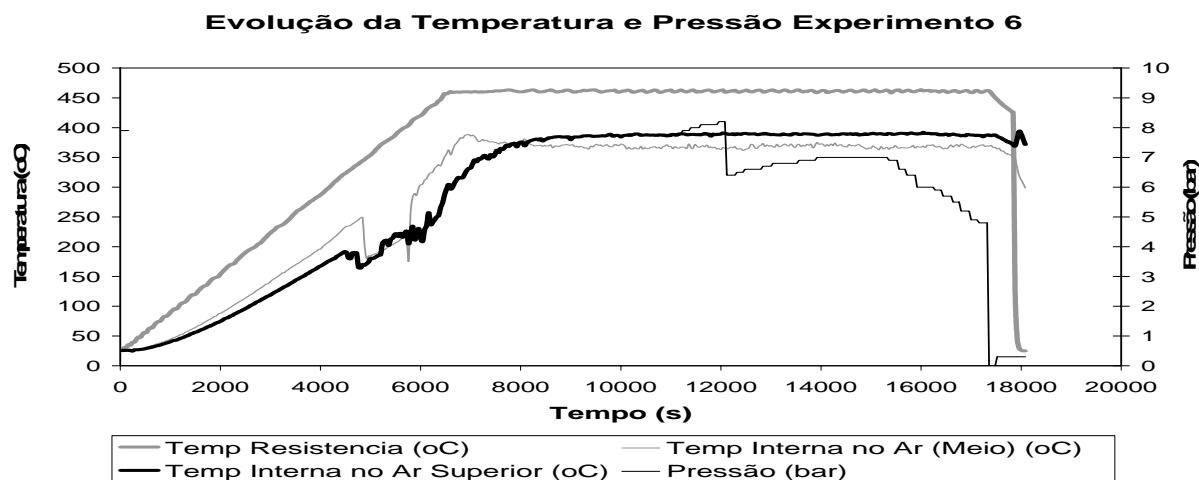


Figura 3.19 – Evolução da temperatura e pressão do experimento 6



Figura 3.20 – Carvão produzido no a) quarto ensaio b) quinto ensaio c) sexto ensaio

Sem pressão:

Evolução da Temperatura e Pressão Experimento 6

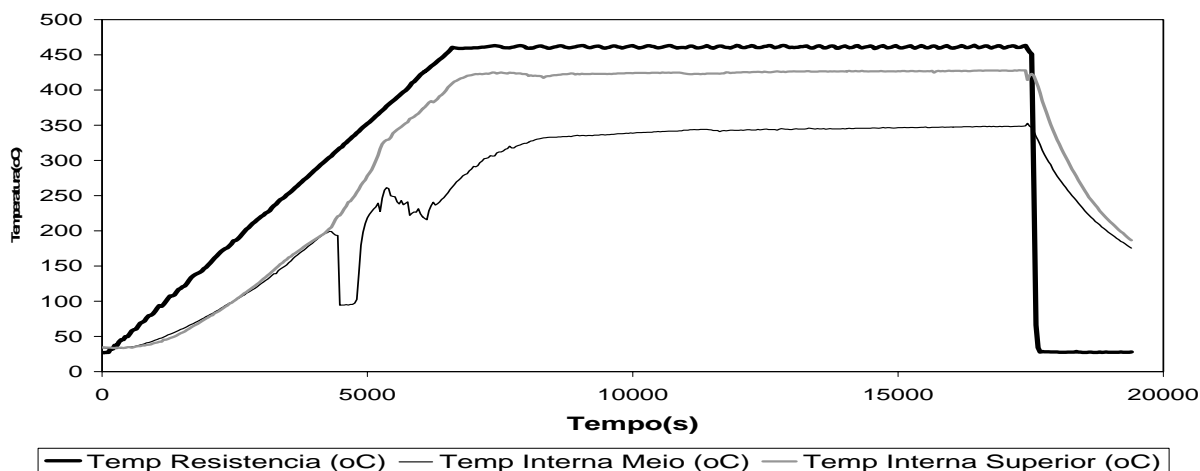


Figura 3.21 – Evolução da temperatura do experimento 7

Evolução da Temperatura e Pressão Experimento 8

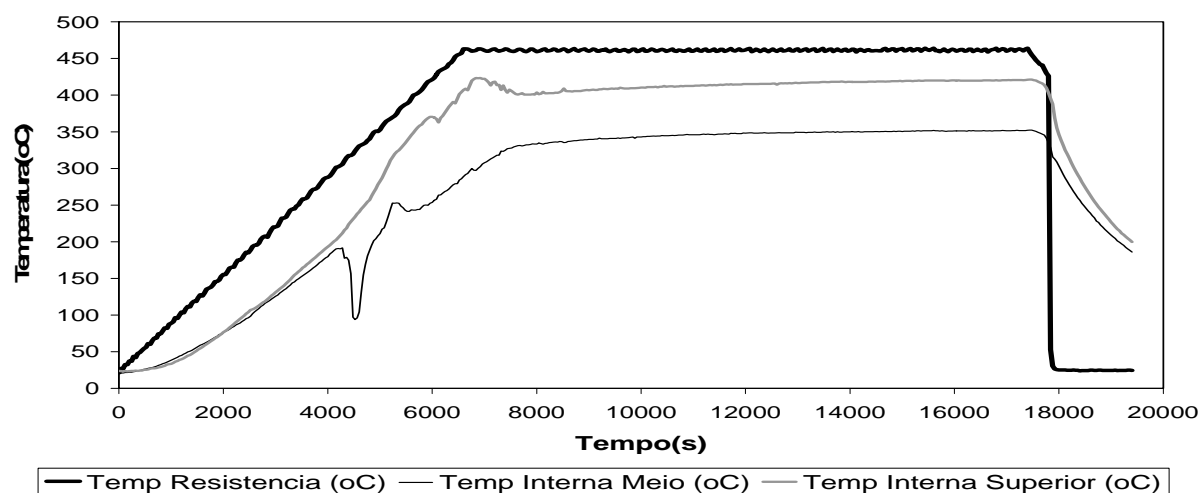


Figura 3.22 – Evolução da temperatura do experimento 8

Evolução da Temperatura e Pressão Experimento 9

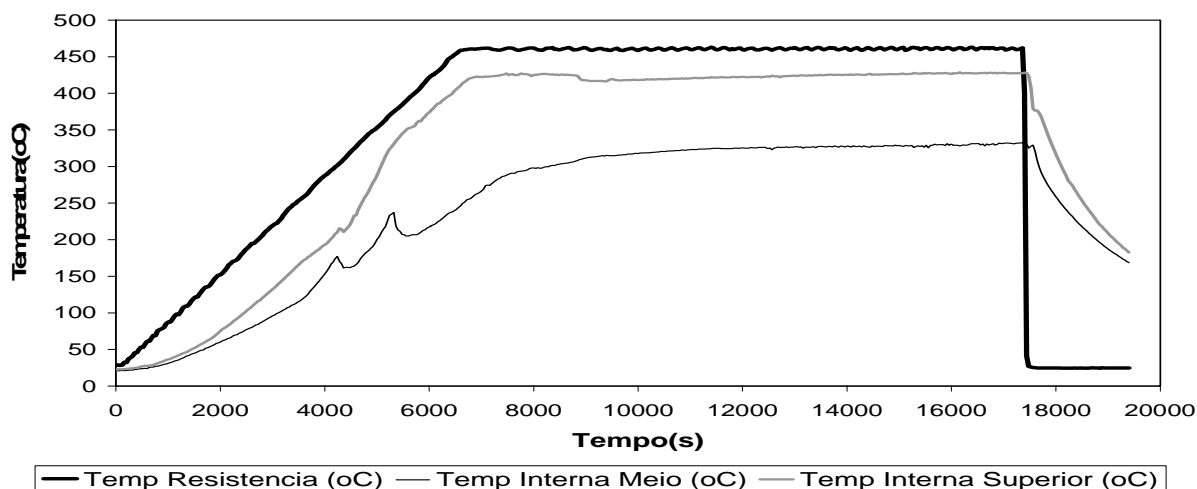


Figura 3.23 – Evolução da temperatura do experimento 9



Figura 3.24 – Carvão produzido no a) sétimo ensaio b)oitavo ensaio c) nono ensaio

Analisando os experimentos ilustrados, percebe-se um comportamento bem regular do primeiro e terceiro grupos de ensaios. No entanto, nos experimentos com pressão e sem reposição de nitrogênio observa-se um comportamento totalmente irregular da pressão, apresentando pequenos vazamentos mas que globalmente têm grande influência, como pode-se observar. Além da irregularidade do patamar de pressão no segundo grupo de experimentos há também um determinado período onde há uma grande oscilação de temperatura, tanto na parte superior do reator quanto no meio. Esse período coincide com um período crítico de liberação de voláteis da reação, exigindo aberturas mais frequentes da válvula de controle. Como não há reposição de gases o que se verifica no interior do reator é uma série de descompressões adiabáticas, acarretando quedas súbitas de temperatura no interior do reator.

Pelas imagens do carvão produzido nos experimentos percebe-se grande semelhança entre os produtos dos ensaios realizados com as mesmas configurações e diferenças claras entre o carvão de ensaios com configurações diferentes. O carvão produzido com patamar bem definido de pressão, ao contrário dos outros dois, não exhibe a presença de alcatrão, apresentando um produto mais limpo e de melhor aparência. Seguindo nessa linha, o carvão produzido sob pressão, mas sem reposição, apresenta menos alcatrão nas paredes que o carvão advindo do último grupo de experimentos, mostrando que mais alcatrão ficou retido no interior do produto devido ao aumento da pressão - conforme foi sugerido pelo autor Antal em seus trabalhos. No entanto, não é possível afirmar qual o melhor carvão obtido sem a análise imediata - os resultados desta estão anexados ao trabalho.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Comparando o sistema implantado, figura 3.1, com o proposto no início dos trabalhos, figura 2.2, apesar de dificuldades na seleção dos componentes, montagem ou mesmo de necessidades encontradas no decorrer do projeto, pode-se verificar que todas as etapas previstas estão presentes em ambos. Os vários ensaios realizados demonstram confiabilidade, do sistema implementado, em algumas configurações, mas também demonstraram pouca eficiência em outras. Levando-se em conta a situação inicial da pesquisa, os resultados até aqui obtidos representam um salto de qualidade e inovação.

O que no início dos trabalhos era um equipamento obsoleto, desconhecido, em um galpão sem estrutura, transformou-se em um sistema integrado e moderno - desde a estrutura do galpão, com uma sala de controle isolada do ambiente externo, de onde os processos são centralizados e controlados por um PC que permite a visualização on-line dos experimentos em andamento, até às próprias plantas instaladas, montadas sobre plataformas consagradas pela indústria, com componentes confiáveis e modernos.



Figura 3.25 – A partir da primeira imagem superior esquerda, em sentido horário, temos: a sala de controle, vista do experimento de pirólise da sala de controle, planta de pirólise e planta de torrefação.

No entanto, ainda é preciso corrigir alguns pontos fracos do sistema implementado: na linha de pressão é fundamental a seleção de uma válvula mais adequada aos fins do projeto, pois a válvula atual se mostrou pouco resistente à agressividade do processo; na aquisição de dados está sendo aguardado o envio do módulo para aquisição dos termopares no interior do reator com comunicação Modbus, que precisará ser instalado no painel de controle; no programa supervisor ainda há muito o que desenvolver, como a implementação do protocolo ANSI utilizado pelo controlador da temperatura da válvula; quanto ao controle deve-se experimentar o controle de temperatura pelo termopar do interior do reator. Essas são apenas algumas de várias alterações que podem ser feitas para aprimorar o sistema proposto. Foi dado o passo inicial e o trabalho conjunto e multidisciplinar proposto mostrou resultados.

Portanto, salvo algumas possíveis modificações para aprimorar a funcionalidade do equipamento, o objetivo proposto foi atingido com relativo sucesso, e hoje no IBAMA está montada a primeira planta de pirólise sob pressão do Brasil, e uma das poucas do mundo.

4 CONCLUSÃO

Neste capítulo serão apresentados os frutos e a importância do trabalho realizado no desenvolvimento profissional do autor.

O trabalho desenvolvido passou por todas as etapas de realização de um projeto: identificação das necessidades, elaboração do esboço da planta, estudo das disponibilidades de mercado, contato com empresas, escolha dos componentes, adaptação de peças, desenvolvimento de peças sob medida, montagem, testes e validação do sistema proposto. Ainda não é possível afirmar que o projeto está perfeitamente concluído, além do que todo equipamento pode e deve ser aprimorado para que um dia possa ser utilizado em larga escala.

Durante o desenvolvimento da nova tecnologia pode-se aprender muito sobre todas as dificuldades e satisfações proporcionadas por um projeto de desenvolvimento de um equipamento inovador. Por ser um projeto multidisciplinar, em um ambiente até certo ponto estranho a engenheiros de controle e automação, este foi um desafio ainda maior e por isso ainda mais gratificante. Além da instalação do equipamento pôde-se observar uma grande troca de conhecimentos, que apenas um trabalho multidisciplinar pode oferecer.

Portanto, a participação nesse projeto de pesquisa cumpriu com o objetivo de melhorar a formação profissional do aluno, aproximando a experiência prática da formação acadêmica. Durante um ano o trabalho foi realizado com empenho e os resultados propostos no início do projeto, conforme aqui descritos, foram alcançados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANEEL. 2005. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. 2ª edição_Brasília: ANEEL.
- ANTAL, Michael J. J.; MOK, William S.. 1983. Effects of Pressure on Biomass Pyrolysis. Cellulose Pyrolysis Products. Thermochemica Acta 68, 155-164.
- ANTAL, Michael Jerry Jr. e MOK, William Shu-Lai.1990. Review of Methods for Improving the Yield of Charcoal from Biomass. Energy & Fuels, Volume 4, Number 4, 221-225.
- ANTAL, Michael J. J.; CROISSET, Eric; DAI, Xiangfeng; DEALMEIDA, Carlos; MOK, William S.; NORBERG, Niclas. 1996. High-Yield Biomass Charcoal. Energy & Fuels 10, 652-658.
- ANTAL, Michael J. J.; ALLEN, Stephen G.; DAI, Xiangfeng; SHIMIZU, Brent; TAM, Man S.; GRONLI, Morten. 2000. Attainment of the Theoretical Yield of Carbon from Biomass. Ind. Eng. Chem. 39, 4024-4031.
- ANTAL, Michael J. J.. 2003. The Art, Science and Tchcology of Chaarcoal Production. Ind. Eng. Chem. 42, 1619, 1640.
- BARRAU, Olivier. 2004. Étude du Frottement et de L'usure d'acier à outils de travail à chaud. Toulouse: Institute National Polytechnique de Toulouse.
- DOAT, Jaqueline. 1984. Hydro-liquéfaction de bois tropicaux et d'autres Biomasses Tropicales. Bois et Forets des Tropiques 206, 51-72.
- FRANKLIN, Gene F.; POWELL, J. David; WORKMAN, Michael. 1998. Digital Control of Dyinamic Systems. 3a edição_Menlo Park: Addison-Wesley.
- GIRARD, P.. 2002. Charcoal production in Africa: what future? – Unasylya 211, Wood Energy, 30-34.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia; www.ibge.gov.br; Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura – 2003.
- KRISTIANSSON, Birgitta; LENNARTSON, Bengt. 2006. Robust Tuning of PI and PID Controllers. IEEE Control System Magazine, February 2006, 55 – 69.
- LI, Yun; ANG, Kiam Heong; CHONG, Gregory. 2005. PID Control System Analysis, Design, and Techonology. IEEE Transactions on Control Systems Techonology 13, 559-576.
- LI, Yun; ANG, Kiam Heong; CHONG, Gregory. 2006. PID Control System Analysis and Design. IEEE Control Systems Magazine February 2006, 32-41.
- MODICON INC, Automation Systems. 1996. Modicon Modbus Protocol Refence Guide. North Andover: Electronic Industries Alliance.
- MORAES, Cícero C. de; CASTRUCCI, Plínio de L. 2001. Engenharia de Automação Industrial - 1ª edição Rio de Janeiro: Editora LTC – Livros Técnicos e Científicos.
- MME, Ministério das Minas e Energia, www.mme.gov.br, Balanço Energético Nacional – 2004.
- NUMAZAWA, Sueu. 2000. Contribution à l'étude de la pyrolyse lente sous pression de bois. Détermination des patamètres optima du procede et caractéristiques des produits obtenus. Compiègne: Université de Technologie de Compiègne.

OGATA, Katsuhiko. 2003. Engenharia de Controle Moderno - .4ª edição São Paulo: Editora Prentice Hall

Omega, www.omega.com, – Z Section – Omega Temperature Handbook.

PINHEIRO, Paulo C. da C.; SAMPAIO, Ronaldo S.; REZENDE, Maria E. A. de; BASTOS, José G. F. 2001. Fundamentos e Prática da Carbonização da Biomassa. Belo Horizonte : Primeiro Congresso Internacional de Uso da Biomassa Plantada para Produção de Metais e Geração de Eletricidade.

QUIRINO, Waldir F. Utilização Energética de Resíduos Vegetais, Laboratório de Produtos Florestais/IBAMA.

Silviminas, Sociedade Mineira de Silvicultura; www.silviminas.com.br, Estudos Setoriais – Carvão Vegetal – 2004/05.

STASSEN, H. E. 2002. Developments in charcoal production technology. Unasylva 211, Wood Energy, 34-35.

ANEXOS

A.1 TABELA DE EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Sensores	Tipo de Saída	Faixa de Trabalho	
Termopar Tipo k	Tensão	0 - 1250 °C	
Transdutor de Pressão (TP510)	Corrente (4-20mA)	0 - 120 bar	
Controladores / Indicadores	Comunicação	Controle	Qtd
Novus 1100 (Controlador)	RS 485 / Modbus	PID - Auto Sintonizável	2
Rex CB 100 (Controlador)	RS 485 / ANSI X3.28	PID - Auto Sintonizável	1
Novus 480i (Indicador)	NA	NA	1
Interfaces de Aquisição	Nº de Canais		
ALMEMO 2590-9	9		
Linx ADS 0500	16		
Atuadores Elétricos	Corrente	Qtd	
Relés de Estado Sólido (SSR)	30A	3	
Válvulas / Regulador de Pressão	Tipo	Faixa de Trabalho	
Swagelock	Segurança	Depende da Mola	
Jefferson 1327	Solenóide	0 - 50 bar	
Pro Star Gold	Regulador	0 - 14 bar	
Linha de Pressão	Diametro	Resistência	Rosca
Tubulação de Aço	8mm (Diam. Ext.)	300 bar	NA
Conexão de Anilha de Aço	8mm (Diam. Int)	300 bar	¼ NPT
Software	Fabricante		
LabVIEW	National Instruments		
AqDados	Linx		
AqDAnalisys	Linx		
Outros	Material	Resistência	Fabricante
Copo do Reator	Aço XN26TW	750 bar	Sotelem
Tampa Reator	Aço XN26TW	750 bar	Sotelem
Conjunto de Resistência	NA	850°C	Sotelem
Mesa	Aço	NA	Sotelem
Fita de Aquecimento	NA	450°C	
Disjuntor	NA	30 A	Siemens

A.2 PLANTA DE LIGAÇÕES ELÉTRICAS DO PAINEL DE CONTROLE

A.3 ANÁLISE IMEDIATA DOS EXPERIMENTOS DE AJUSTE

A.4 ANÁLISE IMEDIATA DOS EXPERIMENTOS FINAIS

A.5 PLANTAS EQUIPAMENTOS