

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

DIMINUIÇÃO DAS EMISSÕES DE POLUENTES ATRAVÉS DO CONTROLE DE  
COMBUSTÃO EM MALHA FECHADA DE FORNOS A GÁS

por

Luciano Anacker Leston

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, outubro de 2007

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

DIMINUIÇÃO DAS EMISSÕES DE POLUENTES ATRAVÉS DO CONTROLE DE  
COMBUSTÃO EM MALHA FECHADA DE FORNOS A GÁS

por

Luciano Anacker Leston  
Engenheiro de Controle e Automação

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

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Eduardo André Perondi

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Isaac Newton Lima da Silva

Prof. Dr. Flavio José Lorini

Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Prof. Dr. Flavio José Lorini  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, outubro de 2007.

## RESUMO

Este trabalho aborda o desenvolvimento de um sistema de controle em malha fechada para a temperatura e concentração de oxigênio em um forno a gás. É apresentada a fundamentação teórica da combustão, assim como uma revisão sobre as principais soluções já desenvolvidas para o controle de temperatura e combustão. Uma bancada experimental com o forno e o sistema de controle de temperatura e combustão foi estruturada e instrumentada com sensores de temperatura, no interior e no exterior do forno, e sensor de concentração de oxigênio no duto da chaminé. Desenvolveu-se um sistema de leitura para a realização de medidas dos sensores e seus respectivos condicionadores, assim como um sistema de interface de potência para os atuadores e uma interface de comunicação serial via RS-232 com microcomputadores. Foram identificadas e mapeadas as condições de operação do forno e, realizou-se a caracterização do funcionamento da válvula de gás (válvula pneumática) e da turbina de ar. Criou-se um modelo do funcionamento do forno (temperatura e concentração de oxigênio) e, com base no mesmo, desenvolveu-se o algoritmo de controle. O modelo teórico do sistema de controle foi implementado experimentalmente. Realizaram-se simulações e testes a partir do modelo teórico de controle e da implementação experimental. A validação do controle desenvolvido foi comprovada através da verificação da convergência dos sinais para os valores de referência desejados. O controle propiciou também uma diminuição de emissões dos gases poluentes da combustão em comparação com o sistema tradicional de controle liga-desliga. O valor de emissão de NO<sub>x</sub> estabilizou em um valor inferior para uma mesma temperatura. Os picos de emissão de hidrocarbonetos foram praticamente eliminados. Constatou-se também uma redução significativa na emissão de CO. Conclui-se que o trabalho atingiu as metas propostas de desenvolver uma arquitetura de controle de temperatura e combustão.

**Palavras-chave:** controle de combustão, controle de temperatura, concentração de oxigênio e emissão de gases poluentes.

## ABSTRACT

### “POLLUTANT EMISSION REDUCING TROUGHT CLOSED LOOP CONTROL OF COMBUSTION OF GAS OVENS”

This work approaches the development of a system of control in closed loop for the temperature and concentration of oxygen in an oven. The theoretical recital of the combustion is presented, as well as a revision on the main solutions already developed for the control of temperature and combustion. An experimental apparatus/workbench with the oven and the system of control of temperature and combustion was structuralized and instrumented with temperature sensors, both in the interior and the exterior of the oven, and sensor of concentration of oxygen, in the duct of the chimney. A system of reading for the accomplishment of measures of the sensors was developed, together with their respective conditioners, as well as a system of interface of power for the actuators and an interface of serial communication RS-232 with microcomputers. They had been identified and mapped the operational conditions of the oven as well as the characterization of the functioning of the gas valve (pneumatic valve) and of the air turbine. A model of the functioning of the oven (temperature and concentration of oxygen) was created and an algorithm of control was developed. The theoretical model of the control system was implemented experimentally. It was done simulations and tests from the theoretical model of control and the experimental implementation. The validation of the developed control was proved through the verification of the convergence of the signals for the desired values of reference. The control also propitiated a reduction of emissions of the pollutant gases of the combustion in comparison with the traditional on-off system of control. The value of emission of NO<sub>x</sub> was steady in a reduced value for a same temperature. The peaks of emission of hydrocarbons practically had been eliminated. A significant reduction in the CO emission was also evidenced. One concludes that the work reached the proposed goals to develop an architecture of temperature and combustion control.

**Keywords:** combustion control, temperature control, oxygen concentration and emission of pollutant gases.

## ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>O Problema do Controle de Temperatura e Combustão.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3</b>	<b>Os Objetivos Específicos.....</b>	<b>2</b>
<b>1.4</b>	<b>A Organização do Trabalho .....</b>	<b>3</b>
<b>2.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA COMBUSTÃO .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>Combustão .....</b>	<b>4</b>
2.1.1	Teorias da Combustão .....	4
2.1.2	Razões Estequiométricas da Combustão.....	6
2.1.3	Efeitos da Razão Estequiométrica – <i>Curva de Hook</i> .....	8
2.1.4	Tipos de Combustíveis .....	10
2.1.5	Poder Calorífico Superior e Inferior.....	12
2.1.6	Temperatura de Chama .....	13
2.1.7	Inflamabilidade dos Gases .....	15
<b>2.2</b>	<b>Os Poluentes Atmosféricos .....</b>	<b>18</b>
2.2.1	Materiais Particulados .....	18
2.2.2	Monóxido de Carbono.....	21
2.2.3	Óxidos de Nitrogênio .....	21
2.2.4	Óxidos de Enxofre.....	24
<b>2.3</b>	<b>Estado da Arte do Controle de Temperatura e Combustão.....</b>	<b>27</b>
<b>3.</b>	<b>IMPLEMENTAÇÃO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>32</b>
<b>3.1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>32</b>
<b>3.2</b>	<b>Descrição dos Componentes do Sistema.....</b>	<b>33</b>
3.2.1	Componentes Mecânicos.....	34
3.2.2	Sensores.....	37
3.2.3	Componentes Eletrônicos.....	39
<b>4.</b>	<b>MODELAGEM E IDENTIFICAÇÃO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>42</b>
<b>4.1</b>	<b>Identificação das Características de Funcionamento da Válvula Pneumática.....</b>	<b>42</b>
<b>4.2</b>	<b>Identificação das Características de Funcionamento da Turbina de Ar .....</b>	<b>44</b>
<b>4.3</b>	<b>Determinação da Faixa Operacional do Forno .....</b>	<b>45</b>
<b>4.4</b>	<b>Mapeamento das Características do Forno .....</b>	<b>46</b>
<b>4.5</b>	<b>Identificação das Características do Sensor de Oxigênio.....</b>	<b>53</b>
<b>4.6</b>	<b>Caracterização dos Sensores de Temperatura .....</b>	<b>55</b>

4.7	Identificação e Modelagem Dinâmica do Sistema.....	57
5.	PROJETO DE CONTROLADORES PI PARA TEMPERATURA E OXIGÊNIO....	61
5.1	As Ações dos Controladores Adotados.....	61
5.2	Ajuste dos Ganhos dos Controladores .....	62
5.3	Validação dos Ajustes dos Ganhos .....	65
5.4	O Controlador Completo.....	67
5.5	Resultados das Simulações do Controlador.....	68
6.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	71
6.1	Resultados Experimentais do Controlador <i>On-Off</i> .....	71
6.2	Resultados Experimentais do Controlador.....	72
6.3	Resultados Experimentais de Emissões.....	75
7.	CONCLUSÕES .....	78
7.1	Sugestões para Trabalhos Futuros .....	79
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	81

## Lista de Símbolos

$A$	massa de ar .....	[kg]
$A$	área da superfície interna da câmara de combustão .....	[m <sup>2</sup> ]
$A_{ch}$	área do topo da câmara de combustão .....	[m <sup>2</sup> ]
$A_p$	área da superfície do êmbolo.....	[m <sup>2</sup> ]
$C$	massa de combustível .....	[kg]
$C_aH_b$	composição relativa do elemento combustível	
$Cp_g$	calor específico dos gases de combustão.....	[kJ/(kgK)]
$CH_y$	fórmula reduzida do combustível	
$CO$	monóxido de carbono	
$CO_2$	dióxido de carbono	
$GLP$	gás liquefeito de petróleo	
$H_2O$	água	
$HC$	hidrocarbonetos	
$I$	integral	
$K_i$	ganho integral	
$K_p$	ganho proporcional	
$LI_t$	limite inferior ou superior de inflamabilidade na temperatura de interesse .....	[°C]
$LI_{25}$	limite inferior ou superior de inflamabilidade a 25°C	
$m_c$	massa do combustível queimado .....	[kg/s]
$m_g$	massa dos gases de combustão.....	[kg/s]
$N_2$	nitrogênio	
$NO$	óxido de nitrogênio	
$NO_2$	óxido de nitrogênio	
$N_2O$	óxido de nitrogênio	
$O_2$	oxigênio	
$OH$	hidroxila	
$P$	proporcional	
$PCI$	poder calorífico inferior .....	[kJ/kg]
$PCS$	poder calorífico superior.....	[kJ/kg]
$PI$	proporcional integral	
$P_{mep}$	pressão média efetiva .....	[kPa]



$\text{SO}_2$	óxido de enxofre	
$\text{SO}_3$	óxido de enxofre	
$t$	temperatura .....	[°C]
$T_{ar}$	temperatura de entrada do ar de combustão .....	[K]
$T_{chama}$	temperatura de chama .....	[K]
$\text{V}_2\text{O}_5$	pentóxido de vanádio	

#### Lista de Símbolos Gregos

$\lambda$	relação ar/combustível real e a relação ar/combustível estequiométrica
$\phi$	relação combustível/ar estequiométrica e a relação combustível/ar real

#### Lista de Sub-índices

$a$	número de átomos de carbono no combustível
$b$	número de átomos de hidrogênio no combustível
$y$	relação carbono/hidrogênio
$s$	representa a condição estequiométrica
$a$	coeficiente para o balanço químico
$b$	coeficiente para o balanço químico
$c$	coeficiente para o balanço químico
$d$	coeficiente para o balanço químico
$w$	coeficiente para o balanço químico

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: <i>Curva de Hook</i> .....	9
Figura 2.2: Temperatura adiabática de chama para o gás de médio poder calorífico produzido no processo Koppers-Totzek a partir do carvão mineral. Fonte Garcia (2002). ....	14
Figura 2.3: Influência da temperatura nos limites de inflamabilidade de combustíveis. Fonte Garcia (2002).....	17
Figura 2.4: Emissão de particulados em função do teor de asfaltenos.....	19
Figura 2.5: Concentração de NO em função da temperatura da reação. ....	22
Figura 2.6: Curvas de ponto de orvalho do ácido sulfúrico para gases de combustão com 9 % a 14 % de água. Fonte Garcia (2002). ....	25
Figura 2.7: Efeitos sobre a saúde de homens e animais sujeitos a diferentes concentrações de SO <sub>2</sub> e a diferentes tempos de exposição. Fonte Garcia (2002).....	26
Figura 2.8: Diagrama esquemático do sistema proposto por Sbarbaro et al. (2002). ....	27
Figura 2.9: Diagrama esquemático do sistema proposto por Miyamoto et al. (1996). ....	28
Figura 2.10: Diagrama esquemático do sistema proposto.....	28
Figura 2.11: O sinal MPPS adquirido e a distribuição espectral, conforme o sistema proposto. ....	29
Figura 2.12: Concentrações de O <sub>2</sub> e CO <sub>2</sub> medidas na exaustão para GLP e sem carga no forno.....	30
Figura 2.13: Concentrações de CO medidos na exaustão para GLP referidos a 7% de O <sub>2</sub> .....	31
Figura 2.14: Concentrações de NO <sub>x</sub> e SO <sub>2</sub> medidos na exaustão para GLP referidos a 7% de O <sub>2</sub> ..	31
Figura 3.1: Implementação experimental do sistema de instrumentação e controle do forno. ....	32
Figura 3.2: Diagrama esquemático das ligações do sistema instrumentação e controle do forno. ....	33
Figura 3.3: Fotos do forno utilizado no experimento.....	34
Figura 3.4: Foto da válvula pneumática de acionamento rápido, modelo MHE2-MS1H.....	35
Figura 3.5: Foto da turbina de ar do fabricante Motorcraft utilizada no experimento. ....	36
Figura 3.6: Queimador construído no LAMECC.....	36
Figura 3.7: O sensor de oxigênio de banda larga modelo LSU4.....	37
Figura 3.8: Localização do sensor de temperatura (termopar).....	38
Figura 4.1: Exemplo de diferentes larguras de pulso de um PWM de período T. ....	42
Figura 4.2: Gráfico da vazão de gás <i>versus</i> largura de pulso do sinal de acionamento. ....	43
Figura 4.3: Vazão de ar <i>versus</i> largura de pulso do sinal de acionamento da turbina de ar. ....	45
Figura 4.4: Valores médios das concentrações de O <sub>2</sub> em %. ....	47
Figura 4.5: Valores médios das concentrações de CO <sub>2</sub> em %. ....	48
Figura 4.6: Valores médios das concentrações de CO em ppm. ....	49

Figura 4.7: Valores médios das diferentes concentrações de NO em ppm. ....	50
Figura 4.8: Valores médios das concentrações de NO <sub>x</sub> em ppm. ....	51
Figura 4.9: Valores médios das concentrações de HC em %. ....	52
Figura 4.10: Curva representativa do comportamento do sensor de oxigênio. ....	54
Figura 4.11: Concentrações de O <sub>2</sub> lidas pelo analisador de gases e pelo sensor de oxigênio. ....	54
Figura 4.12: Aproximação linear realizada °C para uV através da tabela do termopar tipo K. ....	55
Figura 4.13: Aproximação linear uV para °C realizada através da tabela do termopar tipo K. ....	56
Figura 4.14: Resposta no tempo da temperatura para as relações ar/combustível medidas. ....	57
Figura 4.15: Comparativo entre as respostas levantadas experimentalmente e a resposta do modelo teórico. ....	58
Figura 4.16: Resposta temporal da concentração de oxigênio para as relações ar/combustível selecionadas do sistema levantadas experimentalmente. ....	59
Figura 4.17: Comparativo entre as respostas medidas experimentalmente e a resposta gerada pela aproximação do modelo teórico. ....	60
Figura 5.1: Exemplo esquemático do controlador proporcional integral utilizado. ....	61
Figura 5.2: Diagrama de blocos do controlador de temperatura do sistema. ....	62
Figura 5.3: Curvas do sinal de controle e do sinal saturado para o caso do controle de temperatura do sistema. ....	63
Figura 5.4: Diagrama em blocos do controlador de concentração de oxigênio do sistema. ....	64
Figura 5.5: Comparativo entre o sinal de controle e o sinal saturado para o controle de concentração de oxigênio do sistema. ....	65
Figura 5.6: Validação dos ajustes dos ganhos do controlador de temperatura do sistema. ....	66
Figura 5.7: Validação dos ajustes dos ganhos do controlador de concentração de oxigênio. ....	66
Figura 5.8: Diagrama de blocos do controlador completo do sistema. ....	67
Figura 5.9: Resposta da simulação do comportamento da temperatura para o sistema de controle completo para uma temperatura de referência desejada de 350 °C. ....	69
Figura 5.10: Resposta no tempo simulada da concentração de oxigênio para o sistema de controle completo para uma entrada de referência desejada de 10 %. ....	69
Figura 5.11: Sinal de controle da vazão de gás utilizada para a atuação sobre a temperatura de saída do sistema (simulação). ....	70
Figura 5.12: Sinal de controle da vazão de ar utilizada para a atuação sobre a concentração de oxigênio na saída do sistema (simulação). ....	70
Figura 6.1: Concentrações de NO e NO <sub>x</sub> medidas com o analisador de gases durante o teste de sistema de controle liga-desliga tradicional. ....	71

Figura 6.3: Resposta no tempo da temperatura para o sistema de controle completo experimental (para uma temperatura desejada de 350 °C).....	73
Figura 6.4: Resposta no tempo da concentração de oxigênio para o sistema de controle completo experimental (para uma entrada desejada de 10 %)......	73
Figura 6.5: Sinal de controle utilizado para o controle da vazão de gás que regula a temperatura do forno. ....	74
Figura 6.6: Sinal de controle da vazão de ar que regula a concentração de oxigênio do sistema experimental. ....	74
Figura 6.7: Concentração de oxigênio medida com o analisador de gases durante o teste de controle do sistema experimental. ....	76
Figura 6.8: Concentrações de NO e NOx medidas com o analisador de gases durante o teste de controle do sistema experimental. ....	76
Figura 6.9: Concentrações de CO e HC medidas com o analisador de gases durante o teste de controle do sistema experimental. ....	77

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Condições de $\lambda$ e de $\phi$ para mistura pobre, rica e estequiométrica.....	7
Tabela 2.2. Características de algumas famílias de hidrocarbonetos.....	10
Tabela 2.3. Poderes caloríficos de elementos e compostos puros.....	13
Tabela 2.4. Temperatura de chama no ar. Fonte Garcia (2002).....	15
Tabela 2.5. Limites de inflamabilidade de várias substâncias. Fonte Garcia (2002).....	16
Tabela 2.6. Constantes de equilíbrio da reação $N_2 + O_2 \Leftrightarrow 2NO$ .....	23
Tabela 2.7. Exemplo do sistema de regras utilizado na lógica Fuzzy de Fogarty e Bull (1995). .....	29
Tabela 3.1: Dados técnicos da válvula MHE2-MS1H-3/2-M7-K.....	35
Tabela 3.2: Dados técnicos do microcontrolador ATMEGA16.....	39
Tabela 4.1. Combinações de vazões de ar e gás.....	45
Tabela 4.2. Características técnicas do analisador de gases de combustão Ecoline4000. ....	46
Tabela 4.3. Valores médios das concentrações de $O_2$ em % . ....	47
Tabela 4.4. Valores médios das concentrações de $CO_2$ em % . ....	48
Tabela 4.5. Valores médios das concentrações de $CO$ em ppm.....	49
Tabela 4.6. Valores médios das concentrações de $NO$ em ppm. ....	50
Tabela 4.7. Valores médios das concentrações de $NO_x$ em ppm. ....	51
Tabela 4.8. Valores médios das concentrações de $HC$ em % . ....	52
Tabela 4.9. Valores médios (em decimal) das curvas obtidas diretamente do sensor. ....	53

## **1. INTRODUÇÃO**

Possuir o conhecimento de técnicas e fórmulas que nos habilite a controlar sistemas dinâmicos é um requisito básico nos dias de hoje. Os novos equipamentos industriais e domésticos que são produzidos sejam estes eletrônicos, eletromecânicos ou mecânicos, vêm em sua grande maioria acompanhados de um completo e minucioso sistema de controle, permitindo que seus usuários interfiram em um número cada vez maior de variáveis envolvidas em seus processos.

O caminho para a construção de sistemas de controle adequados passa por algumas etapas, sendo uma delas, a modelagem do sistema o qual se quer controlar. Nesta etapa, determina-se como é o funcionamento real e, quais as variáveis e parâmetros envolvidos no processo. A modelagem acompanhada de sua devida validação nos permite trabalhar no sistema de controle utilizando ferramentas computacionais, assim como simular o controle do processo sem a necessidade de criar protótipos, resultando em economia de tempo e, principalmente, redução dos custos financeiros envolvidos.

A principal motivação para o desenvolvimento deste trabalho foi a de colaborar com a diminuição do aquecimento global através da redução de emissão de poluentes para atmosfera com a finalidade de garantir uma melhor qualidade de vida para a humanidade. A inexistência de fiscalização por parte das autoridades e das indústrias em relação às emissões de gases poluentes para a atmosfera faz com que exista também a falsa idéia de que controlar a combustão seja desnecessária. Isto se deve ao fato de que muitos empresários não possuem a correta informação sobre os métodos utilizados nos seus próprios processos industriais, os quais apresentam grandes desperdícios de combustível e são altamente poluentes, pois liberam hidrocarbonetos para a atmosfera. Os objetivos do desenvolvimento deste sistema de controle são o controle de temperatura e diminuição das altas emissões, principalmente de monóxido de carbono,  $\text{NO}_x$  e hidrocarbonetos.

### **1.1 O Problema do Controle de Temperatura e Combustão**

Atualmente, para o controle de temperatura de processos, existem diversas soluções com diferentes métodos e dispositivos, que possibilitam obter resultados satisfatórios. O problema do controle da combustão é o de fazer com que a mesma ocorra em uma relação ar/combustível adequada, pois uma variação na demanda por potência calorífica está associada a variações na

vazão de gás (e/ou de ar) que podem fazer com que a relação ar/combustível se afaste das situações de melhor qualidade de combustão em termos de emissões de poluentes.

## 1.2 Objetivo Geral

Busca-se desenvolver um sistema de controle de temperatura e combustão onde é possível ajustar a curva desejada de temperatura concomitantemente a uma relação apropriada da mistura ar/combustível para que a combustão ocorra com pequenos desperdícios e menores emissões de gases nocivos para atmosfera. O presente trabalho aborda esta proposta de solução.

## 1.3 Os Objetivos Específicos

Os principais objetivos deste trabalho são:

- Estruturar uma bancada experimental com o forno e o sistema de controle de temperatura e combustão;
- instrumentar o sistema com sensores de temperatura, no interior e no exterior do forno, e sensor de concentração de oxigênio no duto da chaminé;
- desenvolver um sistema de condicionamento para o tratamento dos sinais advindos dos sensores, e de um sistema para a realização de medições de seus respectivos condicionadores;
- desenvolver um sistema de interface de potência para os atuadores;
- desenvolver um sistema de comunicação via RS-232 com microcomputadores;
- identificar e mapear as condições de operação do forno;
- caracterizar o funcionamento da válvula de gás (válvula pneumática);
- caracterizar o funcionamento da turbina de ar;
- modelar o funcionamento do forno (temperatura e concentração de oxigênio);
- desenvolver um algoritmo de controle;
- implementar experimentalmente o sistema de controle;
- testar a solução de controle e a implementação experimental;
- comparar os resultados com os métodos utilizados tradicionalmente.

## **1.4 A Organização do Trabalho**

No Capítulo 2, apresenta-se a fundamentação teórica da combustão, assim como uma revisão sobre as principais soluções, encontradas na bibliografia, aplicadas ao controle de temperatura e combustão. No Capítulo 3 é feita uma descrição do sistema físico da implementação experimental e seu funcionamento. No Capítulo 4 são feitas a modelagem e a identificação experimental dos componentes e parâmetros do sistema. No Capítulo 5 são apresentados os projetos dos controladores para a temperatura e concentração de oxigênio, assim como o controle completo interligado. No Capítulo 6 são apresentados os resultados experimentais obtidos nos testes realizados para verificar o desempenho do sistema de controle. No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões do presente trabalho e sugestões para trabalhos futuros.



## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA COMBUSTÃO

Neste capítulo são abordados os principais tópicos relacionados à combustão, além dos principais poluentes atmosféricos decorrentes dos processos físico-químicos envolvidos. Posteriormente também são descritas algumas das técnicas de controle mais utilizadas para o controle de temperatura e combustão.

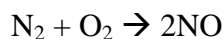
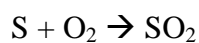
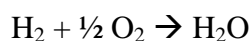
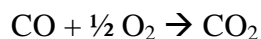
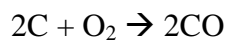
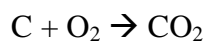
### 2.1 Combustão

A combustão é uma reação de oxidação rápida de uma substância geralmente acompanhada pela geração de calor e luz em forma de chama. O processo começa quando o sistema atinge a temperatura de ignição, prossegue espontaneamente e cessa quando é alcançado o equilíbrio entre a energia calorífica total dos reagentes e dos produtos.

#### 2.1.1 Teorias da Combustão

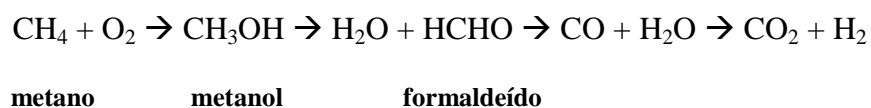
Segundo Garcia (2002), a combustão é um fenômeno que envolve reações químicas que ocorrem em vários estágios em maior ou menor extensão, dependendo de fatores tais como: o tipo de combustível, o grau de mistura com o oxigênio, as geometrias do queimador e da câmara de combustão, a temperatura a que é submetida a mistura, entre outras coisas.

As reações básicas da combustão, ou seja, as principais reações químicas envolvidas na oxidação de um combustível são:



Há três teorias para explicar a combustão de hidrocarbonetos: a teoria da hidroxilação, a teoria dos radicais livres e a teoria do craqueamento. As duas primeiras se aplicam à queima de hidrocarbonetos gasosos.

A *teoria da hidroxilação* estabelece que, quando o hidrocarboneto queima, há primeiramente uma adição ou associação de oxigênio à molécula de hidrocarboneto, produzindo compostos hidroxilados instáveis, que, por sua vez, se transformam em aldeídos, os quais se rompem e se oxidam até se ter o formaldeído. O formaldeído, em seguida, é oxidado a monóxido de carbono (CO) e água (H<sub>2</sub>O) e o CO posteriormente a dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). As reações podem ser representadas, para a queima do metano, na seguinte seqüência:



Este processo de hidroxilação é tão rápido que, em uma mistura de metano com hidrogênio ou com monóxido de carbono, o metano queima mais depressa que o hidrogênio e que o monóxido de carbono.

Outra teoria é a de *formação de radicais livres*. Esta teoria estabelece que, por exemplo, na queima do metano, reações em cadeia são iniciadas em velocidades proporcionais à concentração de formaldeído. Este, por sua vez, sofre um aumento gradual até que um valor estacionário seja atingido, quando então a velocidade de sua formação fica igual à velocidade de sua destruição. O ponto de ataque do oxigênio no hidrocarboneto é considerado como ocorrendo sempre nos átomos de hidrogênio.

A *teoria do craqueamento* se aplica aos casos em que não há tempo suficiente para estabelecer uma boa mistura entre o ar e o combustível e, ao mesmo tempo, a taxa de aquecimento do combustível é muito alta. Neste caso, não há formação de compostos hidroxilados e a alta temperatura a que o combustível é submetido provoca a quebra das moléculas do hidrocarboneto em carbono e hidrogênio, que reagem separadamente com o oxigênio. A presença de carbono livre altamente aquecido explica a emissão de luz amarela. A queima do hidrogênio emite a luz azul ultravioleta. Normalmente, as reações de craqueamento ocorrem ao queimar hidrocarbonetos mais pesados, de cadeias mais longas, como, por exemplo, os óleos combustíveis. No caso da queima dos gases, tais como gás natural e gases de refinaria, é melhor descrita pelas teorias anteriores.

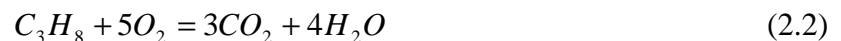
### 2.1.2 Razões Estequiométricas da Combustão

Segundo Heywood (1988), as razões de mistura entre combustível e ar são chamadas, quando balanceadas quimicamente, como *razões estequiométricas* e dependem do balanço de massa de cada elemento químico dos reagentes, da composição do combustível e da proporção necessária entre o combustível e o ar.

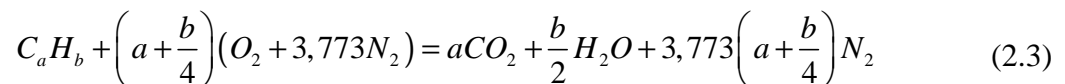
Na combustão de hidrocarbonetos, se o oxigênio disponível for suficiente, o combustível pode ser completamente oxidado. O carbono do combustível é convertido em dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e o hidrogênio em água ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Por exemplo, a combustão completa de um mole de propano  $\text{C}_3\text{H}_8$  pode ser equacionada como:



O balanço de carbono entre os reagentes e os produtos resulta em  $b = 3$ . No balanço de hidrogênio tem-se  $2c = 8$ , ou  $c = 4$ . Do balanço de oxigênio obtém-se como resultado  $2b + c = 10 = 2a$ , ou  $a = 5$ , resultando:



Em geral, a combustão realiza-se a partir do ar atmosférico que apresenta para cada mol de oxigênio 3,773 moles de nitrogênio. Considerando o processo de combustão completa de um combustível hidrocarboneto com a composição molecular de  $\text{C}_a\text{H}_b$ , tem-se a seguinte equação:



A equação (2.3) define a proporção estequiométrica entre o ar e o combustível, ou seja, a quantidade suficiente de oxigênio para converter todo o combustível em produto completamente oxidado. Considerando os pesos moleculares do oxigênio, nitrogênio atmosférico, carbono atômico e hidrogênio como 31,998, 28,16, 12,011 e 1,008, respectivamente, pode-se reescrever a equação (2.3) para a obtenção da relação ar/combustível em uma forma que depende somente da composição do hidrocarboneto  $\text{CH}_y$ , ou seja,

$$\left(\frac{A}{C}\right)_s = \frac{\text{massa de ar}}{\text{massa de combustível}} = \frac{\left(1 + \frac{y}{4}\right)(32 + 3,773(28,16))}{12,011 + 1,008} = \frac{34,56(4 + y)}{12,011 + 1,008} \quad (2.4)$$

onde  $A$  é a massa de ar,  $C$  é a massa de combustível,  $s$  representa a condição estequiométrica e  $y$  é a relação entre o carbono e o hidrogênio no combustível ( $y = b/a$ ).

Uma mistura de ar/combustível com mais ou menos ar do que a razão estequiométrica pode sofrer combustão. Com excesso de ar, ou mistura pobre, como é comumente chamada, o ar extra aparece no produto na mesma forma em que se apresenta no reagente. Com menos ar do que a razão estequiométrica requer, ou seja, mistura rica, o oxigênio é insuficiente para a completa oxidação do combustível hidrocarboneto em  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ . Neste caso, o produto é uma mistura de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  com monóxido de carbono (CO), hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) e nitrogênio ( $\text{N}_2$ ). Em misturas de ar/combustível um pouco pobres (próximas da razão estequiométrica) tem-se uma elevação na emissão de CO. É importante destacar que no presente trabalho, devido à estrutura física do sistema controlado, ele apenas pode operar com uma mistura ar/combustível pobre, pois se a quantidade de ar insuflado for menor do que os valores utilizados levaria o seu comportamento para uma região mais próxima à estequiométrica, porém ocorreria a extinção da chama por falta de vazão de comburente (conforme está apresentado no Capítulo 4).

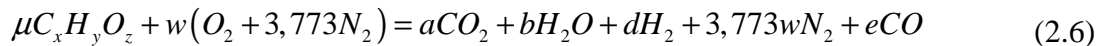
Em razão de a composição dos produtos da combustão ser significativamente diferente para misturas ricas e misturas pobres, e pelo fato de a razão estequiométrica da mistura ar/combustível depender também da composição do combustível, a razão estequiométrica real da mistura ar/combustível é um parâmetro informativo que serve para definir a composição da mistura em um dado instante. O parâmetro  $\lambda$  representa a razão entre a relação ar/combustível real e a relação ar/combustível estequiométrica. Os valores de  $\lambda$  podem ser obtidos pela equação (2.5) e variam conforme mostrado na Tabela 2.1. Utiliza-se também o parâmetro  $\phi$ , que representa o inverso de  $\lambda$ .

$$\lambda = \phi^{-1} = \frac{\left(\frac{A}{C}\right)_{real}}{\left(\frac{A}{C}\right)_s} \quad (2.5)$$

Tabela 2.1. Condições de  $\lambda$  e de  $\phi$  para mistura pobre, rica e estequiométrica.

Mistura	$\lambda$	$\phi$
Rica	<1	>1
Pobre	>1	<1
Estequiométrica	=1	=1

Quando o combustível contém oxigênio, é necessário incluí-lo no balanço entre os reagentes e os produtos, resultando na equação (2.6):



onde,  $\mu$  é o excesso de combustível em relação à quantidade necessária para a combustão estequiométrica e  $w, a, b, d, e$  são os coeficientes para o balanço químico [Heywood (1988)].

Para o combustível utilizado no presente trabalho, o gás liquefeito de petróleo (GLP), que tem na sua composição de 50 % de propano e 50 % de butano, apresentando, respectivamente, as fórmulas químicas de  $C_3H_8$  e de  $C_4H_{10}$ , tem-se como razão estequiométrica o valor de 15,55, ou seja, uma parte de gás para cada 15,55 partes de ar. Em função desta razão estequiométrica, pôde-se determinar através do relacionamento das diferentes combinações de vazões mássicas possíveis para o correto funcionamento do forno (sem extinção da chama, veja seção 4.3) que, o fator  $\lambda$  no presente trabalho encontra-se na faixa de 1,3959 e 3,7402, ou seja, uma mistura ar/combustível afastada da razão estequiométrica (e pobre), evitando assim, as altas emissões de CO.

### 2.1.3 Efeitos da Razão Estequiométrica – *Curva de Hook*

Segundo Plint e Martyr (1997), os efeitos da razão estequiométrica da mistura ar/combustível na combustão podem ser exemplificados através do funcionamento de um motor ciclo Otto a gasolina, o qual pode operar, teoricamente, em razões de mistura ar/combustível na faixa de 8:1 a 20:1, ou seja, em toda a faixa que varia entre uma mistura pobre e uma rica, passando pelo ponto estequiométrico. A relação existente entre a potência e o consumo específico de combustível pode ser medida variando as razões da mistura ar/combustível com a borboleta totalmente aberta e a rotação constante. Os resultados podem ser apresentados na forma de *Curva de Hook*, conforme a Figura. 2.1, que mostra a relação entre o consumo específico ( $bsfc$ ) e a pressão média efetiva ( $Pmep$ ).

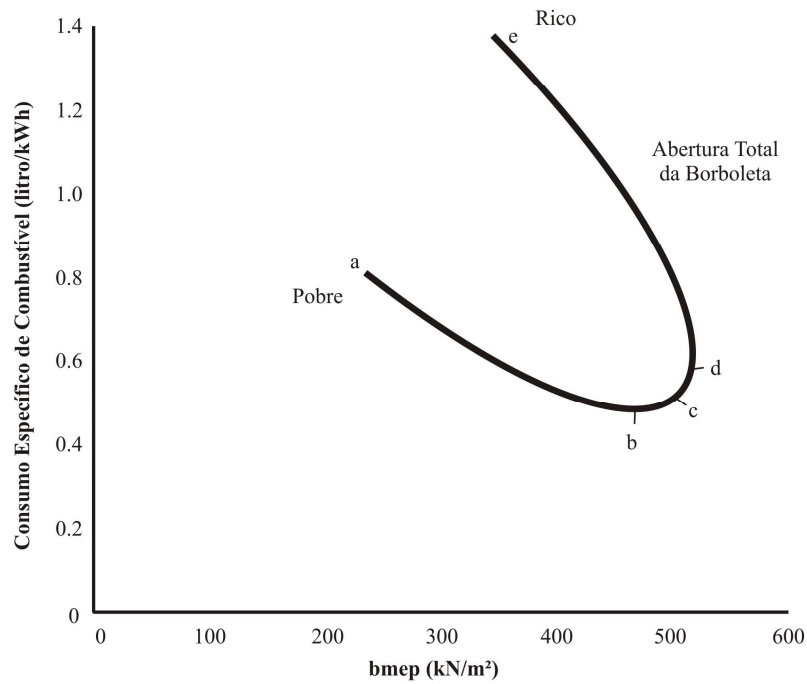


Figura 2.1: *Curva de Hook*.

Na *Curva de Hook*:

- o ponto *a* corresponde ao ponto de operação na qual a mistura é pobre. Neste ponto, a potência é bastante reduzida e o consumo específico pode ser o dobro do consumo específico de melhor eficiência;
- o ponto *b* corresponde ao melhor desempenho do motor (maior eficiência térmica);
- o ponto *c* corresponde à razão estequiométrica da mistura;
- o ponto *d* corresponde à máxima potência, sendo que o consumo específico é cerca de 10% maior do que o consumo específico do ponto de máxima eficiência térmica (ponto *b*);
- o ponto *e* corresponde ao máximo valor de mistura rica em que o motor pode operar.

### 2.1.4 Tipos de Combustíveis

Segundo Wylen e Sonntag (1993), os combustíveis podem ser classificados de acordo com seus estados físicos como: sólidos, como a madeira, o carvão vegetal e a hulha; líquidos, como o querosene e a gasolina; ou gasosos, como o gás natural, o propano e o butano.

A principal matéria-prima para produção de combustíveis líquidos e gasosos é o petróleo, o qual é composto por diversos hidrocarbonetos. A proporção de matéria hidrocarbonada varia de 50 % a 98 %. Essa grande gama de possibilidades não implica em uma mudança fundamental nas propriedades do petróleo cru<sup>1</sup> para diferentes percentuais. Quimicamente, esses hidrocarbonetos estão presentes no petróleo em famílias de parafinas, naftenos e compostos aromáticos (cíclicos). A diferente proporção de cada um deles condiciona o refino, operação pela qual se extraem os combustíveis, sejam estes gasosos, como o propano e o butano; sólidos, como as parafinas; ou líquidos, como o querosene, as gasolinas automotivas, o óleo diesel e o óleo combustível.

A maioria dos combustíveis derivados do petróleo, líquidos ou gasosos, é constituída por uma mistura de muitos hidrocarbonetos. A gasolina, por exemplo, é constituída por cerca de 40 hidrocarbonetos principais com a presença de muitos outros em quantidades mínimas. As famílias mais importantes de hidrocarbonetos derivados de petróleo estão apresentadas na Tabela 2.2, fonte Wylen e Sonntag (1993).

Tabela 2.2. Características de algumas famílias de hidrocarbonetos.

Família	Fórmula	Estrutura	Saturado
Parafina	$C_nH_{2n+2}$	Cadeia	Sim
Olefina	$C_nH_{2n}$	Cadeia	Não
Diolefina	$C_nH_{2n-2}$	Cadeia	Não
Naftaleno	$C_nH_{2n}$	Cíclica	Sim
Aromático Benzeno	$C_nH_{2n-6}$	Cíclica	Não
Aromático Naftaleno	$C_nH_{2n-12}$	Cíclica	Não

<sup>1</sup>

Petróleo cru – termo utilizado para o petróleo bruto, como sai do poço.

Os termos utilizados na definição de combustíveis são referentes à estrutura da molécula, (que pode ser cíclica ou em cadeia, a hidrocarbonetos saturados e não-saturados) e aos hidrocarbonetos com mesmo número de átomos de carbono e hidrogênio, mas com estruturas diferentes. Os hidrocarbonetos não-saturados possuem um ou dois átomos adjacentes unidos por uma valência dupla ou tripla, enquanto que, nos hidrocarbonetos saturados, todos os átomos de carbono são unidos por uma valência simples.

O conjunto dos combustíveis gasosos é o que mais se aproxima de um rendimento e de uma economia de combustão máximos. É um produto limpo, sem impurezas ou cinzas, sem odor e que resulta em alto poder calorífico. Esses gases, em sua maior parte, são originários de jazidas petrolíferas. Normalmente, são encontrados em bolsões ou jazidas subterrâneas e fluem para a superfície associados ao petróleo. Podem ser novamente injetados nos poços para aumentar a vazão do óleo cru, ou ser separados para consumo [Wyllen e Sonntag (1993)].

Segundo Guibet (1999), as principais famílias de hidrocarbonetos são parafínicos, olefínicos, naftalenos, aromáticos e álcoois.

A *família dos parafínicos* possui estrutura em cadeia aberta, apresentando ligações simples nos carbonos saturados com átomos de hidrogênio. A maioria das moléculas é em linha e com ramificações. Os compostos que compreendem a família parafínica terminam todos no sufixo *ano* (ex. metano, etano, propano). As isoparafinas são hidrocarbonetos isômeros das parafinas, como o isooctano e o isobutano, que apresentam cadeia ramificada com características antidetonantes. Destaca-se novamente que no presente trabalho utilizou-se como combustível para o forno o gás liquefeito de petróleo (GLP), pertencente a família dos parafínicos, e que apresenta na sua composição 50 % de propano e 50 % de butano. A fórmula química do propano é  $C_3H_8$  e do butano  $C_4H_{10}$ .

*Os olefínicos* caracterizam-se, como as parafinas, por apresentar uma estrutura em cadeia aberta; todavia, não são saturadas, podendo haver ligações duplas e triplas entre os átomos de carbono. São identificados pelo sufixo *eno* (ex. propeno e octeno). Aparecem com vários isômeros, a partir do buteno, dependendo da localização da ligação dupla na cadeia básica de carbono. Possuem maior atividade química devido a suas ligações duplas. Ligam-se facilmente com o hidrogênio, formando parafinas ou naftalenos, ou ainda com oxigênio, formando uma goma indesejável.

A *família dos naftalenos* tem a mesma fórmula química que a família dos olefínicos, mas possui uma estrutura cíclica ao invés de uma estrutura em cadeia. Cada átomo de carbono tem duas valências simples com outros dois átomos de carbono e duas outras ligações simples com



hidrogênio, carbono ou com ambos simultaneamente. Os hidrocarbonetos da família do naftaleno são identificados pelo acréscimo do prefixo *ciclo* (ex. ciclopentano).

A *família dos aromáticos* inclui a série do benzeno ( $C_nH_{2n-6}$ ), que se caracteriza por ter um único anel aromático, e a série do naftaleno ( $C_nH_{2n-12}$ ), que se caracteriza por ter estrutura com anel cíclico duplo. A série do benzeno possui uma estrutura cíclica insaturada, que apresenta grande estabilidade química, sendo resistente à ignição espontânea. A família dos aromáticos apresenta a possibilidade de adição de grupos de  $CH_2$  nas cadeias laterais, mas não através da expansão dos anéis (ex. tolueno  $C_7H_8$  e xileno  $C_8H_{10}$ ).

*Os álcoois* são compostos saturados com uma estrutura em cadeia em que um átomo de hidrogênio é substituído por uma hidroxila (OH). Podem ser obtidos da oxidação parcial do petróleo ou de vegetais ricos em carboidratos, que se constituem exclusivamente de carbono, hidrogênio e oxigênio.

#### 2.1.5 Poder Calorífico Superior e Inferior

Segundo Garcia (2002), o poder calorífico de um combustível é definido como a quantidade de calor desprendido na sua queima completa (realizada estequiometricamente). Caso a quantidade de calor seja medida na situação em que a água é gerada na queima na fase gasosa, o poder calorífico é chamado de Poder Calorífico Inferior e, no caso em que a água gerada na combustão é considerada na fase líquida, tem-se o Poder Calorífico Superior. A diferença entre eles é, portanto, a entalpia de vaporização da água formada pela queima do hidrogênio contido no combustível e da água já contida no combustível na forma de umidade.

Assim, a relação matemática entre o Poder Calorífico Inferior e o Poder Calorífico Superior é definida pela equação:

$$PCI = PCS - 2440(9H + u) \quad (2.7)$$

onde,  $PCI$  é o poder calorífico inferior kJ/kg em base seca,  $PCS$  é o poder calorífico superior kJ/kg,  $H$  é o teor de hidrogênio do combustível kg/kg em base seca e  $u$  é o teor de umidade do combustível kg de água/kg de combustível seco.

O poder calorífico é determinado em laboratório através de uma bomba calorimétrica com temperatura controlada do banho onde está imersa a bomba em que se faz a queima do combustível. O valor obtido é sempre o Poder Calorífico Superior. Assim, o Poder Calorífico Inferior é sempre obtido por meio de cálculo, usando-se a expressão acima. Para tanto, é

necessário se conhecer o teor de hidrogênio do combustível e sua umidade. Observe-se que, normalmente, o que mais se usa é exatamente o Poder Calorífico Inferior, uma vez que, na maioria dos processos industriais, os gases de combustão são liberados a temperaturas altas onde a água neles contida se encontra na fase gasosa.

Os poderes caloríficos de diversos elementos e compostos podem ser vistos na Tabela 2.3 a seguir, fonte Garcia (2002):

Tabela 2.3. Poderes caloríficos de elementos e compostos puros.

Substância	Fórmula	Massa Molecular	Poder Calorífico Superior (Kcal/Kg)	Poder Calorífico Inferior (Kcal/Kg)
Carbono	C	12,01	7819	7819
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	2,016	33900	28642
Monóxido de Carbono	CO	28,01	2412	2412
Enxofre	S	32,06	2210	2210
Gás Sulfídrico	H <sub>2</sub> S	34,076	3939	3631
Amônia	NH <sub>3</sub>	17,031	5364	4439
Metano	CH <sub>4</sub>	16,041	13249	11940
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30,067	12384	11336
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44,092	12018	11065
n-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58,118	11822	10919
i-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58,118	11794	10891
n-Penteno	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72,144	11702	10829
i-Penteno	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72,144	11680	10252
Neo-Penteno	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72,144	11635	10761
Eteno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28,051	12009	11260
Propeno	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42,077	11674	10925
n-Buteno	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56,102	11563	10817
i-Buteno	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56,102	11502	10754
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26,036	11929	11527
Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	46,067	7302	6619
Metanol	CH <sub>3</sub> OH	32,041	5692	5037
Benzeno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78,107	10103	9698
Tolueno	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	92,132	10231	9776
Xileno	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106,158	10347	9854

### 2.1.6 Temperatura de Chama

Segundo Garcia (2002), a temperatura teórica de chama é calculada considerando-se que todo o calor resultante da combustão é transformado em entalpia dos produtos de combustão, isto é, esta é a temperatura adiabática de chama. Assim, não há neste cálculo nenhuma perda de calor

para o ambiente. A expressão que permite calcular a temperatura de chama, através de um balanço de energia, é dada pela equação:

$$T_{chama} = T_{ar} + m_c PCI / (m_g C p_g) \quad (3.1)$$

onde,  $T_{chama}$  é a temperatura de chama K,  $T_{ar}$  é a temperatura de entrada do ar de combustão K,  $m_c$  é a massa do combustível queimado kg/s,  $PCI$  é o poder calorífico inferior kJ/kg,  $m_g$  é a massa dos gases de combustão kg/s e  $C p_g$  é o calor específico dos gases de combustão kJ/(kgK).

A temperatura de chama pode ser muito útil na comparação entre combustíveis para uma dada necessidade de calor e temperatura. Assim, por exemplo, a temperatura de chama de um gás de médio poder calorífico (1027 kJ/kg), como o gerado no processo de gaseificação do carvão mineral num ambiente de vapor de oxigênio em pressão atmosférica (Processo Koppers-Totzek), vide Figura 2.2, é mais alta que a temperatura de óleo combustível derivado do petróleo (poder calorífico = 2269 kJ/kg). Isto demonstra que a análise baseada apenas nos poderes caloríficos não retrata o desempenho do combustível.

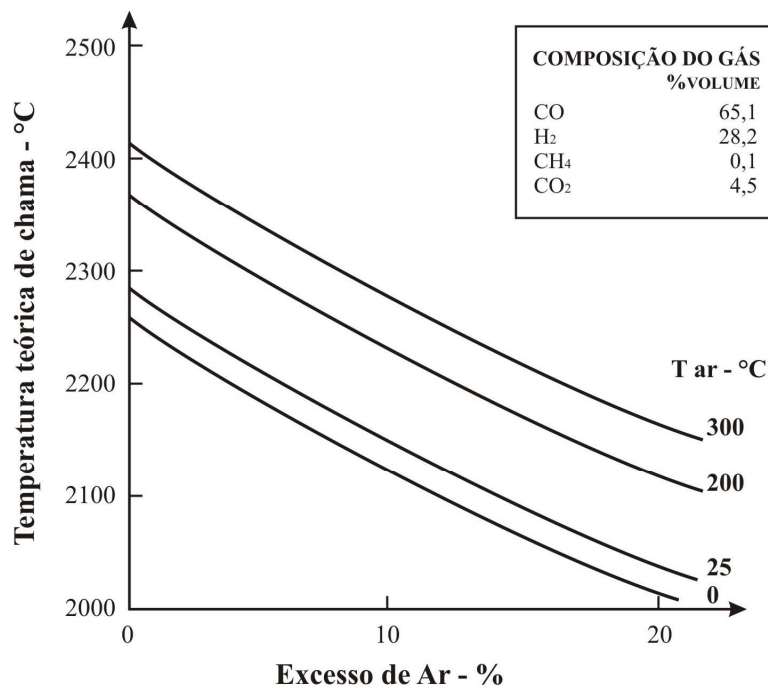


Figura 2.2: Temperatura adiabática de chama para o gás de médio poder calorífico produzido no processo Koppers-Totzek a partir do carvão mineral. Fonte Garcia (2002).

Como ilustração, a Tabela 2.4 apresenta as temperaturas de chama para várias substâncias no ar.

Tabela 2.4. Temperatura de chama no ar. Fonte Garcia (2002).

SUBSTÂNCIA	TEMPERATURA DE CHAMA [°C]
Hidrogênio	2210
Monóxido de Carbono	2468
Metano	1918
Etano	1949
Propano	1967
n-Butano	1973
Eteno	2343
Propeno	2254
Buteno	2221
Acetileno	2632

O combustível utilizado no forno é composto por 50 % de propano e 50 % de butano, assim, neste trabalho, a temperatura de chama no ar é de aproximadamente 1970 °C.

#### 2.1.7 Inflamabilidade dos Gases

Segundo Garcia (2002), a menor concentração de gás ou de vapor combustível em ar atmosférico ou em oxigênio puro que consegue estabelecer uma combustão auto-sustentada é chamada de “limite inferior de inflamabilidade”. Por outro lado, a maior concentração de gás ou de vapor combustível que consegue manter a combustão, sem a contribuição de uma fonte externa de calor, é chamada de “limite superior de inflamabilidade”.

Um gás ou um vapor combustível misturado com ar ou oxigênio não entra em combustão se sua concentração for muito baixa ou muito alta. Isto é, se a mistura ar/combustível está muito pobre (abaixo do limite inferior de inflamabilidade) ou muito rica (acima do limite superior de inflamabilidade), não ocorre queima. A queima só ocorre se a mistura combustível – comburente estiver dentro da faixa delimitada pelos limites citados de inflamabilidade.

É importante destacar que a energia liberada pela reação de queima é máxima na composição estequiométrica e mínima nas concentrações próximas aos limites de inflamabilidade. No sistema desenvolvido no presente trabalho, buscou-se sempre trabalhar em uma região intermediária compreendida entre estes dois limites, de acordo com a determinação

da faixa operacional (veja seção 4.3) e com o mapeamento das características do forno (veja também a seção 4.4).

Usualmente, os limites de inflamabilidade são determinados a 20 °C e 100 kPa (1,02 kgf/cm<sup>2</sup>). Na Tabela 2.5 estão listados os limites de inflamabilidade de vários combustíveis.

Tabela 2.5. Limites de inflamabilidade de várias substâncias. Fonte Garcia (2002).

Substância	Limite Inferior de Inflamabilidade (% Vol. De Gás No Ar)	Limite Superior De Inflamabilidade (% Vol. De Gás No Ar)
Hidrogênio	4,0	75,0
Metano	5,0	15,0
Etano	3,0	12,5
Propano	2,1	10,1
n-Butano	1,86	8,41
i-Butano	1,80	8,44
n-Penteno	1,40	7,80
i-Penteno	1,32	-
n-Hexano	1,25	6,90
n-Heptano	1,0	6,0
n-Octano	0,95	3,20
Eteno	2,75	28,6
Propeno	2,0	11,1
n-Buteno	1,98	9,65
n-Penteno	1,65	7,70
Benzeno	1,35	6,75
Tolueno	1,27	6,75
Xileno	1,0	6,0
Acetileno	2,5	81,0
Metanol	6,72	36,5
Etanol	3,28	18,95
Amônia	15,5	26,6
Gás Sulfídrico	4,3	45,5
Gás Natural	3,1	19,6

Para o GLP (gás liquefeito de petróleo) e uma temperatura ambiente de 25 °C e à pressão atmosférica, os valores limites de inflamabilidade calculados a partir das vazões de ar e gás aplicadas ao sistema foram de: limite inferior de inflamabilidade = 1,31 % e limite superior de inflamabilidade = 2,477 %.

Os limites de inflamabilidade são influenciados pelas seguintes variáveis:

- Temperatura;
- pressão;

- geometria e tamanho do vaso de contenção;
- teor de inertes na mistura;
- presença de partículas finas de metais;
- estrutura molecular dos combustíveis.

Um aumento da temperatura da mistura normalmente alarga a faixa de inflamabilidade. Para os alcanos, uma regra prática estabelece que cada aumento da temperatura de 100 °C abaixa o limite inferior de inflamabilidade em 8%.

Quando a temperatura é aumentada a níveis mais altos, atinge-se a temperatura de auto-ignição, ocorrendo então a chamada combustão espontânea. A Figura 2.3 ilustra a influência da temperatura na inflamabilidade de um combustível, retratando a elevação de sua concentração no ar em função da temperatura.

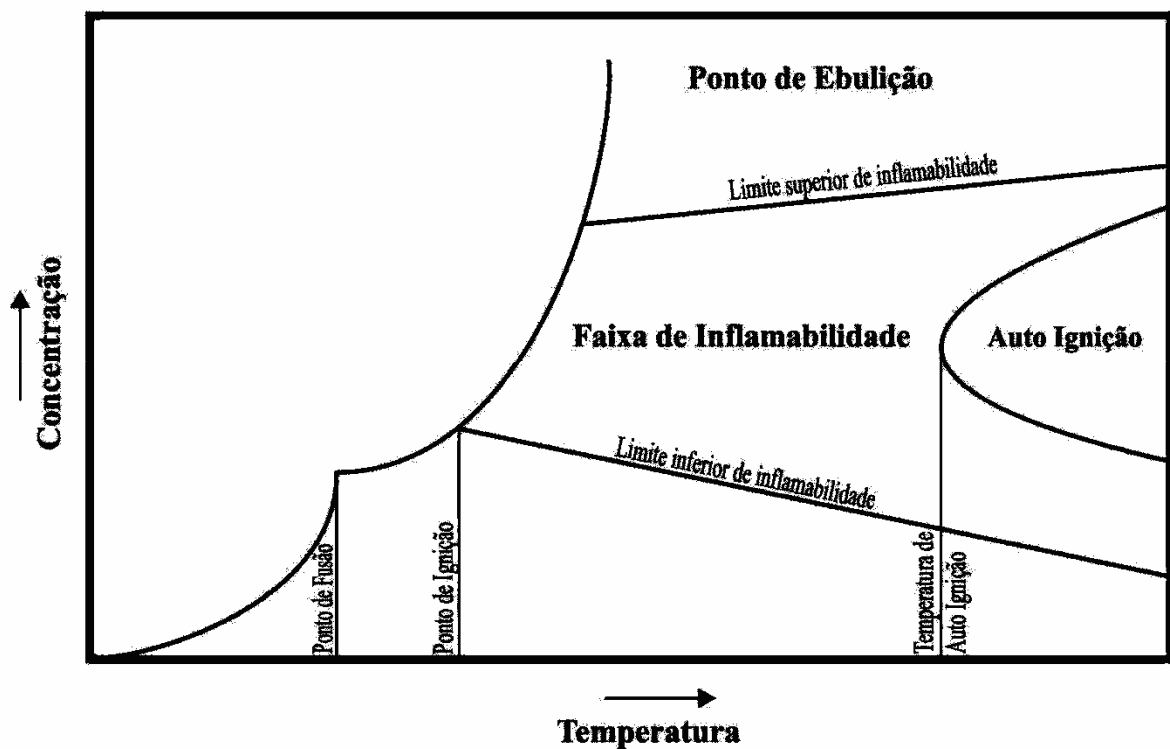


Figura 2.3: Influência da temperatura nos limites de inflamabilidade de combustíveis. Fonte Garcia (2002).

## 2.2 Os Poluentes Atmosféricos

Os poluentes que podem ser formados durante a queima de qualquer combustível orgânico são:

- Materiais particulados;
- óxidos de enxofre ( $\text{SO}_2$  e  $\text{SO}_3$ );
- monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ );
- óxidos de nitrogênio (NO,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_2$ ).

As quantidades destes poluentes dependem dos combustíveis usados, dos modelos dos equipamentos de queima, do seu estado de conservação e também das condições de operação destes equipamentos.

### 2.2.1 Materiais Particulados

Fumaça, fuligem e cinzas resultantes da combustão são denominados, genericamente, de *materiais particulados*. Fuligem é o termo que denomina genericamente as pequenas partículas de carbono e material carbônico, parcialmente oxidado, isoladas ou impregnadas com cinzas resultantes da combustão completa do restante do combustível. As partículas de carbono existentes na fuligem são resultantes do craqueamento térmico do combustível (no caso dele ser óleo ou gás) que não tiveram tempo ou oxigênio suficientes para completar a queima. A fuligem é o que podemos chamar de fumaça preta.

A fumaça propriamente dita, ou a “fumaça branca”, é constituída por gotículas de hidrocarbonetos ou outros produtos químicos voláteis não queimados. No caso da queima de madeira, a fumaça é extremamente complexa, sendo constituída por álcoois, cetonas, ácidos orgânicos e alcatrão vegetal que não queimaram, resultantes da destilação seca da lignina.

A formação de fuligem na queima de óleos combustíveis se dá através de duas rotas distintas: a da fase gasosa e das gotículas líquidas. O mecanismo de formação de partículas que contêm carbono via fase gasosa se dá pela pirólise dos hidrocarbonetos parafínicos formando radicais de acetileno (etino). Os etinos, assim produzidos, polimerizam-se formando polietinos. Estes polietinos podem se aglomerar com partículas de hidrocarbonetos poliaromáticos,

formando partículas de fuligem compostas por misturas complexas de fumaça negra, polietinos, carbonos e cinzas.

Já, os compostos presentes na fase líquida, dentro das gotículas resultantes da atomização do óleo combustível pesado, podem ser, basicamente, componentes aromáticos ou asfaltenos. Os componentes aromáticos, ao serem submetidos às altas temperaturas das chamas em atmosferas pobres de oxigênio, sofrem um processo de pirólise que leva à sua desidrogenação e condensação simultânea dos anéis aromáticos, formando cadeias aromáticas cada vez mais complexas, produzindo assim fumaça negra. Já, os asfaltenos, que não são voláteis, ao serem submetidos às temperaturas das chamas em regiões pobres em oxigênio, craqueiam termicamente formando cascas carbônicas em volta das gotículas de óleo em vaporização. Estas microsferas carbônicas ocas são chamadas de cenosferas. Normalmente as cenosferas apresentam uma massa entre 3 % e 10 % da massa da gotícula original, podendo, no entanto, aumentar a massa se o diâmetro da gotícula também crescer. A forma e a composição final da partícula de fuligem é função, portanto, da composição do combustível, especialmente das concentrações relativas de aromáticos e asfaltenos do mesmo, além de também ser função da geometria da fornalha, do queimador e da distribuição de ar existente na combustão. Pode-se, entretanto, afirmar que a fuligem, excetuando-se as cinzas existentes no combustível, contém tipicamente de 90 % a 98 % de carbono, pequeno percentual de oxigênio e o restante constitui-se principalmente de hidrogênio. Os tamanhos das partículas ficam na faixa de 10 a 1000 nanômetros. Conclui-se, assim, que a emissão de particulados, estando as demais condições de operação dos queimadores fixas, é diretamente proporcional ao teor de asfaltenos do óleo combustível. A Figura 2.4 a seguir mostra a relação destes parâmetros obtida por Monroe (1978 apud Garcia, 2002).

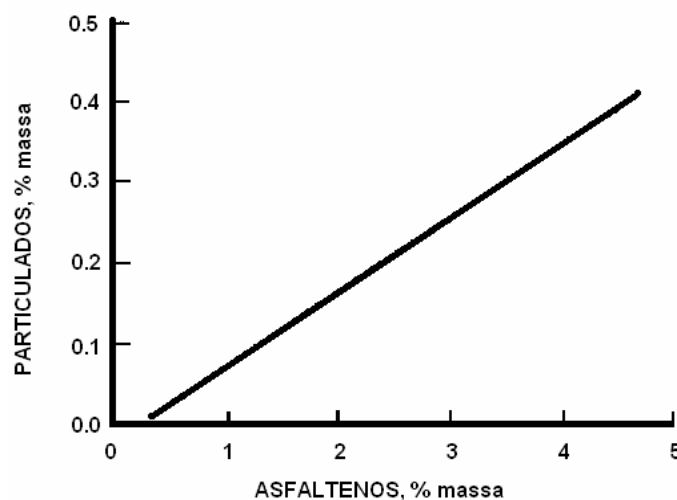


Figura 2.4: Emissão de particulados em função do teor de asfaltenos.



Nem todos os hidrocarbonetos aromáticos resultam em fumaça negra ou em coque. Ocorrem sempre moléculas poliaromáticas intermediárias. Algumas altamente cancerígenas, como o benzo-*al*fa-pireno aderidas às partículas de fuligem. Estas partículas são, portanto, mais agressivas à saúde animal e humana. Esta é uma razão adicional para se procurar sempre a minimização da geração de fuligem. Na queima de combustíveis líquidos, a geração de fuligem se dá sempre na região entre a superfície do combustível e as chamas circunvizinhas, isto é, sempre em uma região rica em combustível. A quantidade de fuligem produzida pode ser reduzida com a diminuição do diâmetro das gotículas de combustível e com o aumento da velocidade destas gotículas em relação ao ar de queima. Altas velocidades de injeção em relação ao ar resultam em uma minimização da emissão de particulados, assim como das cinzas, que também são constituídas de materiais particulados. Neste trabalho, o sistema desenvolvido não apresentou a geração de fuligem visível.

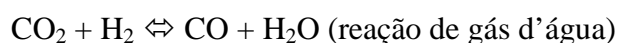
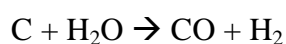
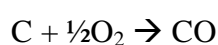
As cinzas são formadas pelos resíduos inorgânicos resultantes da queima completa do combustível. Os componentes mais comuns das cinzas de óleos derivados de petróleo são: sódio, vanádio, sílica, magnésio, níquel, cálcio, ferro e cobre. O sódio pode ser originário do sal presente no petróleo e da soda cáustica que algumas refinarias injetam no processo de destilação para controlar a taxa de corrosão de seus equipamentos. Do ponto de vista de poluição, deve-se destacar a importância do vanádio (na forma  $V_2O_5$ ) que catalisa a formação de  $SO_3$  nos gases de combustão. Além deste metal, o níquel também deve ser evitado, uma vez que seu óxido é cancerígeno. Por esta razão, em alguns países se restringe a emissão resultante da queima de combustíveis que o contenham.

As misturas de cinzas e produtos de corrosão das paredes metálicas dos fornos ou caldeiras impregnadas de ácido sulfúrico que condensa dos gases de combustão constituem a chamada *fuligem ácida*. Esta fuligem, ao sair da chaminé, tende a cair nas proximidades da mesma e apresenta efeito altamente corrosivo sobre os equipamentos e superfícies onde se deposita. A melhor maneira de evitar esse tipo de fuligem é operar com temperaturas dos gases de chaminé sempre acima do ponto de orvalho do ácido sulfúrico. Outra solução é a adição de óxido de magnésio ao combustível. Convém lembrar que bicos de queimadores em mau estado de conservação ou limpeza levam a grandes emissões de material particulado. Também, o uso de combustíveis com viscosidades altas no momento da queima provocam má atomização e conseqüente emissão de altas doses de particulados.

### 2.2.2 Monóxido de Carbono

O monóxido de carbono (CO) é um gás inodoro e sem cor, formado na combustão incompleta de qualquer material que contenha carbono. É um gás altamente venenoso, pois reage com a hemoglobina do sangue formando carboxihemoglobina, que torna a hemoglobina incapaz de capturar o oxigênio e realizar assim a troca gasosa oxigênio/gás carbônico nos pulmões. O seu limite de tolerância é de 39 cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> de ar.

As reações que dão origem ao monóxido de carbono são as seguintes:



A concentração de CO nos gases de combustão depende da temperatura dos gases e do excesso de ar na combustão. Misturas de ar/combustível pobres e bem próximas da razão estequiométrica levam a altos teores de CO, lembrando que no presente trabalho, o sistema operou com uma mistura pobre e as misturas ar/combustível compreendidas em valores afastados do valor da razão estequiométrica.

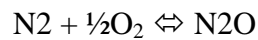
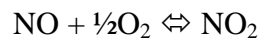
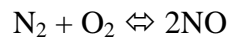
### 2.2.3 Óxidos de Nitrogênio

Os óxidos de nitrogênio, denominados genericamente de NO<sub>x</sub>, são os seguintes:

- NO;
- NO<sub>2</sub>;
- N<sub>2</sub>O;
- N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>;
- NO<sub>3</sub>;
- N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>;
- N<sub>3</sub>O<sub>4</sub>;
- N<sub>2</sub>O<sub>7</sub>.

Os óxidos NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O e N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> são instáveis e se decompõe em NO e oxigênio. Os óxidos de nitrogênio são formados na queima de combustíveis a partir do nitrogênio do ar usado na queima e a partir do nitrogênio eventualmente contido no combustível. Assim, combustíveis isentos de compostos nitrogenados, tais como gás natural, GLP (gás liquefeito de petróleo) e gasolina, também formam NO<sub>x</sub> ao serem queimados.

As principais reações de formação dos óxidos de nitrogênio são:



A equação química ( $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO}$ ) define a chamada rota térmica de formação de NO e ocorre em condições de altas temperaturas.

A Figura 2.5 mostra a concentração de NO em função da temperatura da reação segundo a *American Gas Association* (1965 apud Garcia, 2002).

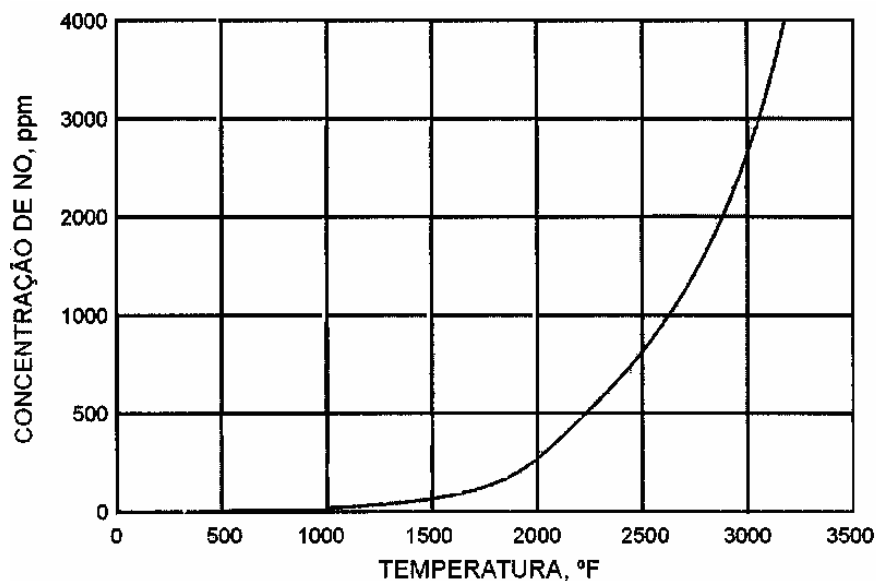


Figura 2.5: Concentração de NO em função da temperatura da reação.

As constantes de equilíbrio da reação de formação de NO ( $K_1$ ) e de sua decomposição em O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> ( $K_2$ ) segundo Knox (1921 apud Garcia, 2002) são listadas na Tabela 2.6.

Tabela 2.6. Constantes de equilíbrio da reação  $N_2 + O_2 \rightleftharpoons 2NO$ .

Temperatura (°F)	K1 (m <sup>3</sup> /mol.s)	K2 (m <sup>3</sup> /mol.s)	Tempo
1330	$4 \times 10^{-2}$	$1,74 \times 10^{-10}$	81,6 anos
2230	37,8	$2,33 \times 10^{-4}$	1,26 dias
2950	$9,06 \times 10^3$	1,20	2,08 minutos
3310	$1,40 \times 10^5$	55,5	5,06 segundos
4030	$3,37 \times 10^7$	$6,98 \times 10^4$	0,0106 segundos

Os óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ) são responsáveis por fenômenos de poluição global, tais como, a chuva ácida e formação do gás estufa. As maiores fontes de emissão de óxidos de nitrogênio são os processos de combustão em plantas industriais e sistema de exaustão de automóveis. O teor de  $NO_x$  nos gases de combustão de caldeiras e fornos petroquímicos queimando óleos varia na faixa de 100 ppm para equipamentos pequenos, e até 1000 ppm, para equipamentos de grande porte. Excessos de ar de queima altos levam a maiores emissões de  $NO_x$ , razão pela qual os queimadores de alta eficiência, por usarem baixíssimos excessos de ar, conseguem reduzir substancialmente as emissões. No sistema desenvolvido o valor de emissão de  $NO_x$  ficou próximo de 30 ppm e estável (veja Capítulo 6).

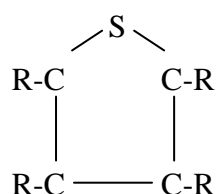
Os inconvenientes dos óxidos de nitrogênio na atmosfera são vários. O maior problema é a formação de ácido nítrico ( $HNO_3$ ), a partir do  $NO_2$ , que, juntamente com o ácido sulfúrico produzido pela emissão de  $SO_x$ , causa problemas de corrosão em metais, mármore e outras pedras, além das chuvas ácidas que destroem florestas e tornam lagos tão ácidos que impedem a vida de peixes. Os óxidos de nitrogênio também podem ser metabolizados no corpo formando nitrosaminas, as quais são cancerígenas, atingindo o cérebro, rins, bexiga, fígado, esôfago, estômago, língua e seios nasais. Outro problema é causado pelo  $N_2O$  que, nas altas camadas da atmosfera, reage com o ozônio prejudicando a camada protetora da Terra contra os raios ultravioletas. O  $NO_2$  nas camadas baixas da atmosfera tem efeito oposto: ao receber radiação ultravioleta libera oxigênio atômico que, por sua vez forma ozônio. O ozônio, nestas circunstâncias, pode reagir com hidrocarbonetos e formar compostos poluentes fotoquímicos, isto é, levando à formação de neblinas secas poluídas.

### 2.2.4 Óxidos de Enxofre

O enxofre presente nos combustíveis é um dos poluentes existentes mais ativos. Isto se deve à corrosão que causa a formação de chuvas ácidas e aos problemas respiratórios que causa à população.

O enxofre nos combustíveis pode estar presente nas seguintes formas:

- mercaptans: R S H;
- sulfetos: R S R;
- dissulfetos: R S S R;
- tiofenos:



- polissulfetos: R S<sub>m</sub> R;
- gás sulfídrico: H<sub>2</sub>S.

Nos carvões minerais, o enxofre aparece freqüentemente associado com a pirita ou seus derivados. Com a combustão, o enxofre é rapidamente convertido a SO<sub>2</sub>, que pode ser lançado na atmosfera ou transformado em SO<sub>3</sub> através da ação catalítica do pentóxido de vanádio, normalmente presente nas cinzas resultantes da combustão. O SO<sub>3</sub>, por sua vez, ao encontrar a água resultante da combustão do hidrogênio ou a contida na atmosfera, reage formando ácido sulfúrico, da seguinte forma:



**pentóxido de vanádio**



A concentração de SO<sub>3</sub> será tanto maior quanto maior for o excesso de ar usado na combustão, razão pela qual também se procura minimizá-lo em queimadores de alta eficiência. Geralmente, o teor de SO<sub>3</sub> nos gases de combustão é de cerca de 0,2 % a 3 % do total dos óxidos de enxofre produzidos e raramente ultrapassa o valor de 50 ppm.

Já, o teor de  $\text{SO}_2$  presente nos gases de combustão é dado por aproximadamente 510 vezes o percentual de enxofre no combustível, o que fornece valores de emissão na faixa de 200 a 2800 ppm em volume. Devido ao combustível utilizado neste trabalho (propano e butano), que não possui enxofre em sua composição, não houve emissões deste poluente.

Os pontos de orvalho do ácido sulfúrico formado na combustão do enxofre podem ser calculados pela equação (3.1):

$$\frac{1}{T_{\text{orv}}} = 2,276 \times 10^{-3} - 2,943 \times 10^{-5} \ln P_{\text{H}_2\text{O}} - 8,58 \times 10^{-5} \ln P_{\text{H}_2\text{SO}_4} + 6,2 \times 10^{-6} \ln P_{\text{H}_2\text{O}} \ln P_{\text{H}_2\text{SO}_4} \quad (3.1)$$

onde,  $T_{\text{orv}}$  é a temperatura do ponto de orvalho K,  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  é a pressão parcial da água mmHg e  $P_{\text{H}_2\text{SO}_4}$  é a pressão parcial do ácido sulfúrico mmHg.

Sob um enfoque prático, é recomendado o uso do gráfico da Figura 2.6 para o cálculo do ponto de orvalho dos combustíveis, o qual determina a temperatura mínima a ser mantida na saída dos gases de chaminé de forma a evitar a condensação de ácido no interior dos equipamentos, (fornos, caldeiras, pré-aquecedores, entre outros).

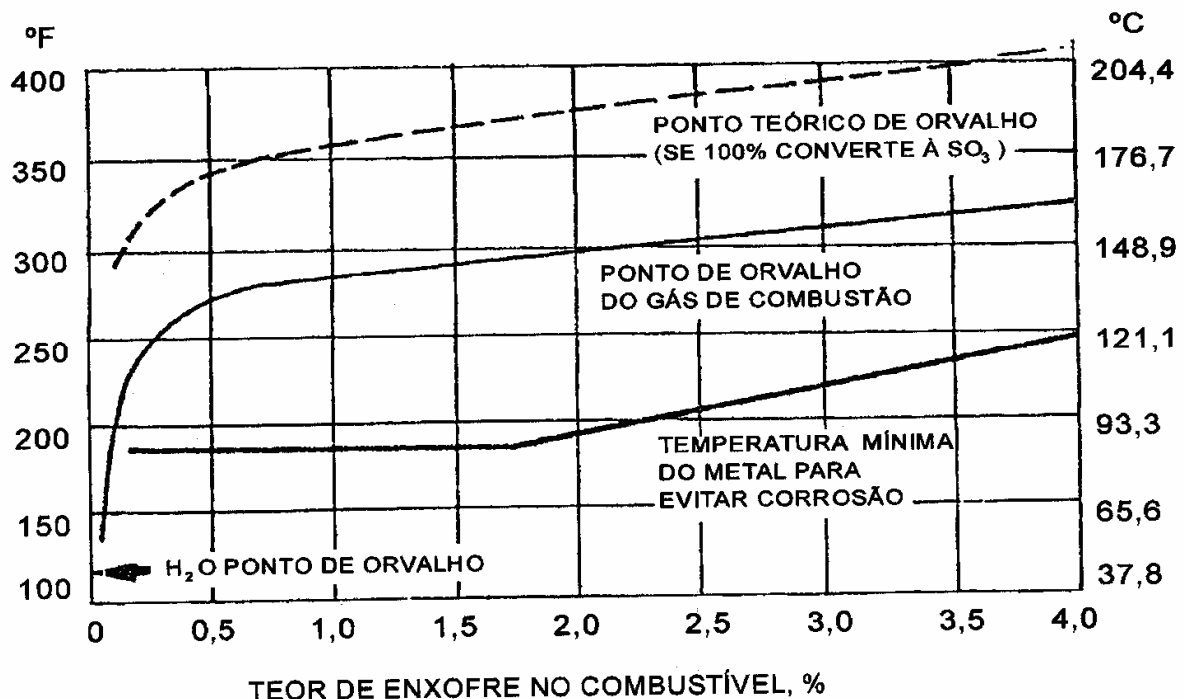


Figura 2.6: Curvas de ponto de orvalho do ácido sulfúrico para gases de combustão com 9 % a 14 % de água. Fonte Garcia (2002).

Os óxidos de enxofre são bastante perniciosos ao homem, animais e plantas.

A Figura 2.7 mostra os efeitos do dióxido de enxofre na saúde de animais e pessoas para vários graus de concentração e de tempos de exposição. Esta figura é particularmente importante,

pois permite avaliar os efeitos do enxofre na saúde de populações vizinhas a fontes poluidoras ou imersas por longos tempos em atmosferas poluídas pelo oxido de enxofre. A zona sombreada representa uma região onde se observou um aumento da mortalidade. A zona hachurada indica a região onde se observou aumento da morbidez e a ponteadada onde se suspeita que a saúde possa ser afetada.

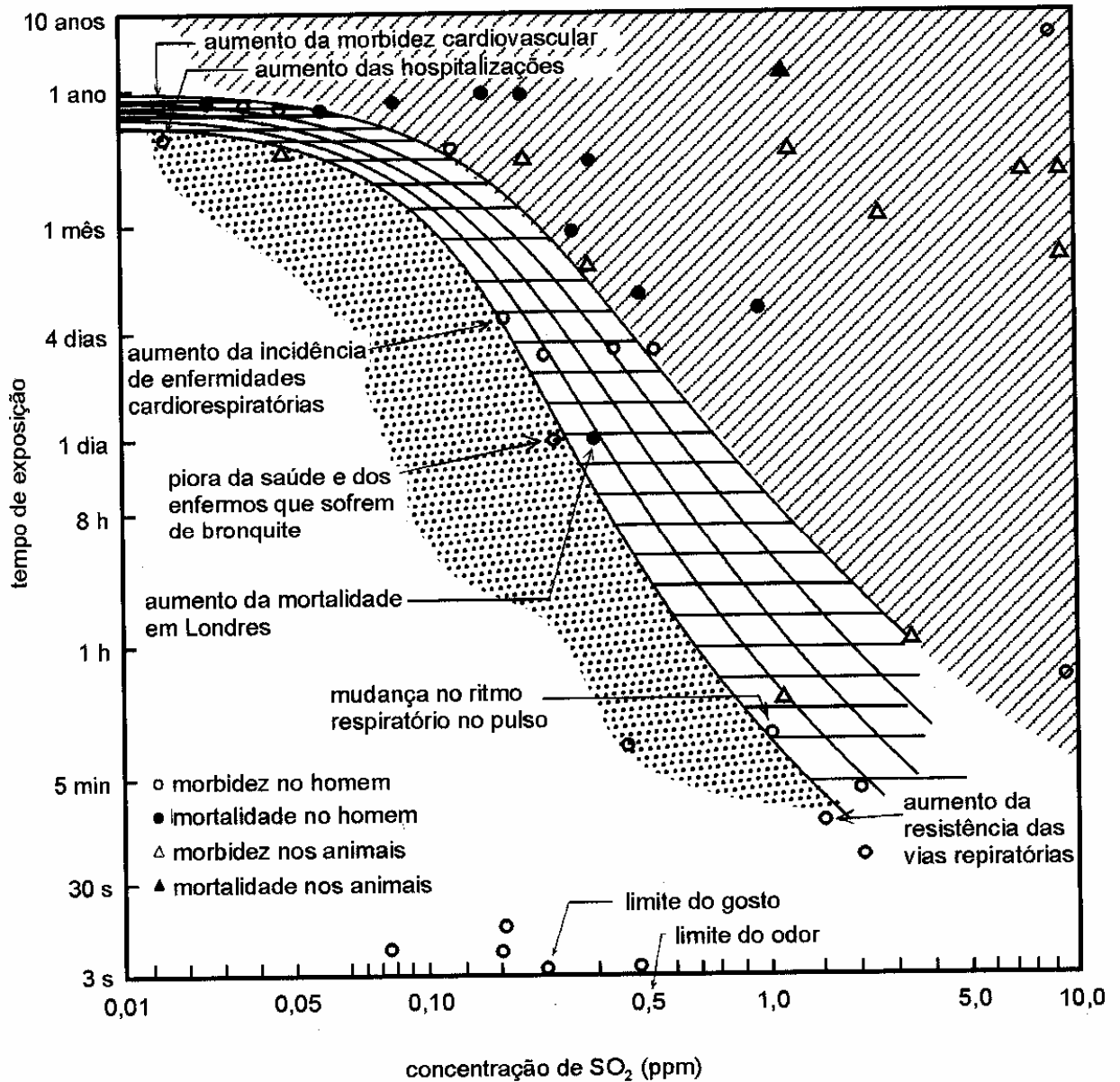


Figura 2.7: Efeitos sobre a saúde de homens e animais sujeitos a diferentes concentrações de  $\text{SO}_2$  e a diferentes tempos de exposição. Fonte Garcia (2002).

## 2.3 Estado da Arte do Controle de Temperatura e Combustão

Nesta seção são apresentadas as principais tecnologias que estão sendo desenvolvidas por pesquisadores sobre o tema de controle de temperatura e combustão. Também são abordadas as formas de controle usualmente utilizadas nos equipamentos industriais.

Em Sbarbaro et al. (2002) e Miyamoto et al. (1996) utiliza-se uma técnica baseada na aquisição de imagens da chama através de câmeras CCD (*Charge Coupled Device*) com seu processamento e controle de combustão sendo feitos através de redes neurais. No esquema proposto por Sbarbaro et al. (2002) a caracterização da chama produzida pelo combustível é realizada por um algoritmo de aprendizado de rede neural. Assim, é possível extrair informações importantes das imagens das chamas através das quais o sistema pode detectar as condições de operação do processo de combustão. Os resultados experimentais demonstram que este método pode efetivamente caracterizar a chama a partir de componentes de suas imagens e com isso controlar a vazão de ar da mistura através de uma válvula acionada a partir da porta paralela de um microcomputador (Figura 2.8).

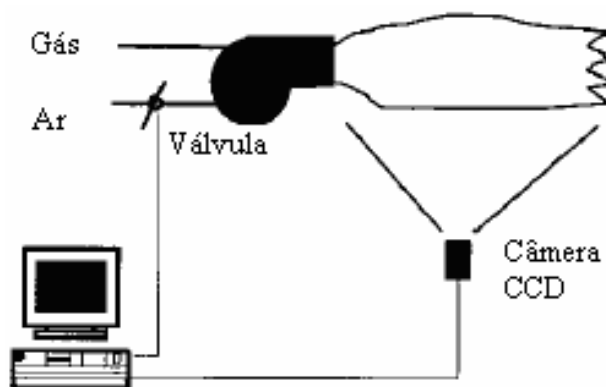


Figura 2.8: Diagrama esquemático do sistema proposto por Sbarbaro et al. (2002).

Em Miyamoto et al. (1996), é utilizado um incinerador cuja chama é filmada e controlada através de um sistema mais complexo para o tratamento das imagens. Como pode ser observado na Figura 2.9, o sistema proposto controla um sistema de alimentação de lixo (que é utilizado como combustível) além da quantidade de ar e de umidade.



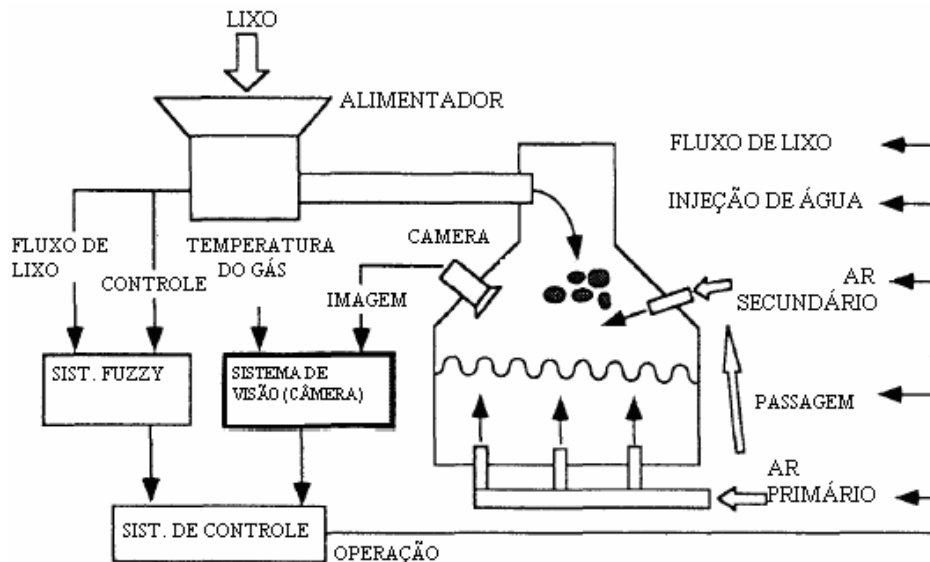


Figura 2.9: Diagrama esquemático do sistema proposto por Miyamoto et al. (1996).

Qin et al. (1998) apresentam uma estratégia de controle multivariável baseada em lógica difusa aplicada ao controle de um forno de coque de um sistema industrial complexo de combustão. Um esquema do sistema proposto pode ser visualizado através da Figura 2.10.

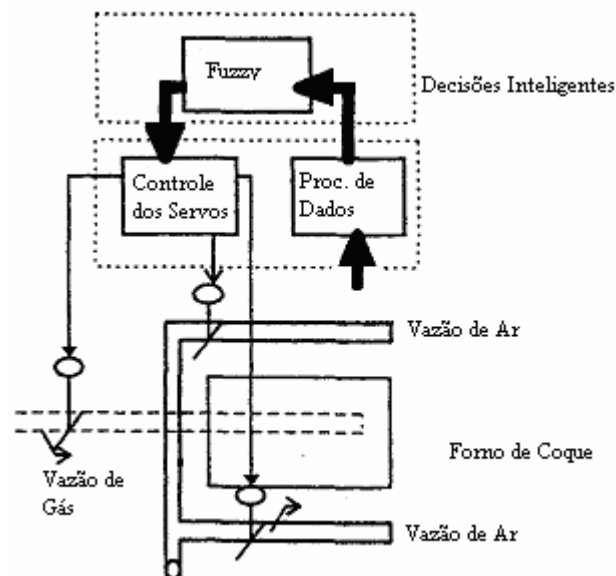


Figura 2.10: Diagrama esquemático do sistema proposto.

Fogarty e Bull (1995) descrevem um método de otimização para as regras individuais de lógica Fuzzy utilizadas em sistemas complexos de combustão. Um exemplo do sistema de regras utilizado na lógica Fuzzy proposta por é mostrado na Tabela 2.7.

Tabela 2.7. Exemplo do sistema de regras utilizado na lógica Fuzzy de Fogarty e Bull (1995).

Oxigênio Muito Alto	Reduzir 4% de Ar	Reduzir 4% de Ar	Rotina de Empobrecer Aumentar 4%	Rotina Estequiométrica Aumentar 4%
Oxigênio Alto	Reduzir 2% de Ar	Rotina de Empobrecer Aumentar 2%	Rotina Estequiométrica Aumentar 2%	Rotina de Enriquecer Aumentar 4%
Oxigênio OK	Rotina de Empobrecer Aumentar 1%	Rotina Estequiométrica Aumentar 1%	Rotina de Enriquecer Aumentar 2%	Aumentar 4% de Ar
Oxigênio Baixo	Sem Ação	Rotina de Enriquecer Aumentar 1%	Aumentar 2% de Ar	Aumentar 4% de Ar
	Monóxido de Carbono Baixo	Monóxido de Carbono OK	Monóxido de Carbono Alto	Monóxido de Carbono Muito Alto

Conforme Wenjiang et al. (1993), uma estratégia de controle pode ser estabelecida baseada na distribuição espectral de um sinal de pulsação MPPS (*Minute Pressure Pulsation Signal*) produzido pela chama captado através de um sensor resistivo de pressão. O método baseia-se na detecção do som produzido pela chama no momento da combustão. A distribuição espectral do sinal MPPS pode descrever o estado da combustão de forma que seu controle possa ser executado.

Um exemplo da distribuição espectral e o sinal MPPS que podem ser obtidos são mostrados através da Figura 2.11, fonte Wenjiang et al. (1993).

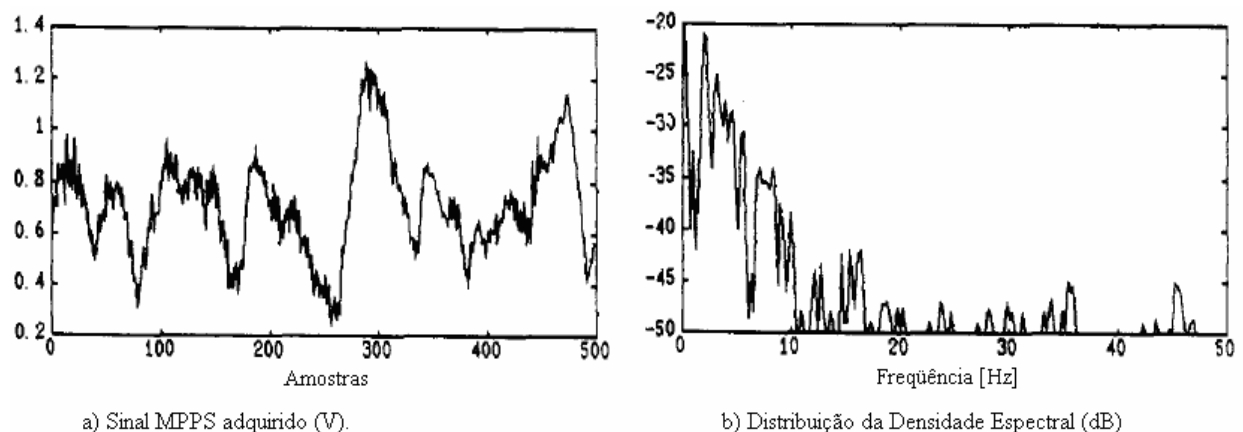


Figura 2.11: O sinal MPPS adquirido e a distribuição espectral, conforme o sistema proposto.

Em Prochnow (2003), o mesmo forno descrito na seção 3.2 desta dissertação foi utilizado para demonstrar a monitoração dos gases de escape e comparar as diferentes tecnologias de sensores. Foi utilizado nos testes um controlador de temperatura e um queimador, ambos convencionais.

O queimador industrial utilizado por Prochnow (2003) possui uma potência muito superior ao queimador construído para o presente trabalho no Laboratório de Mecatrônica e Controle da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (maiores detalhes desta construção serão mostrados no capítulo 3). Sendo então impossível estabelecer comparações diversas com as emissões do trabalho realizado e o trabalho de Prochnow.

Os resultados de seus testes, ou seja, a monitoração de seus gases de escape são mostrados nas figuras 2.12, 2.13 e 2.14 que seguem.

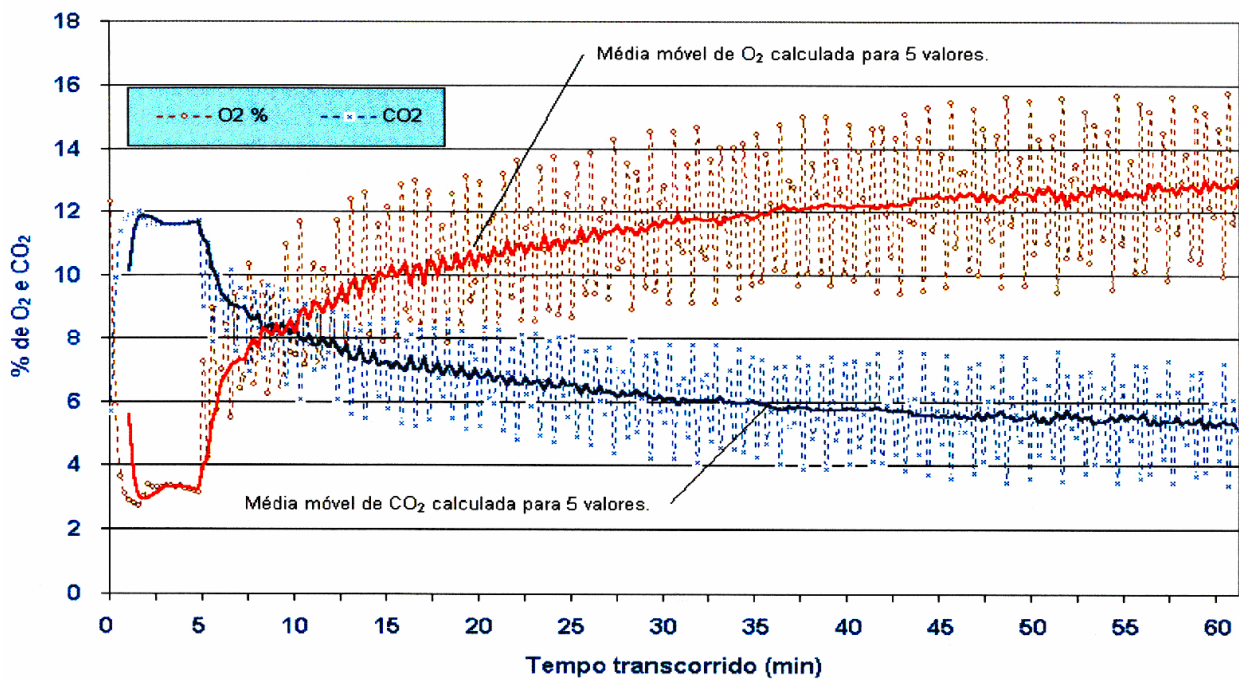


Figura 2.12: Concentrações de O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> medidas na exaustão para GLP e sem carga no forno.

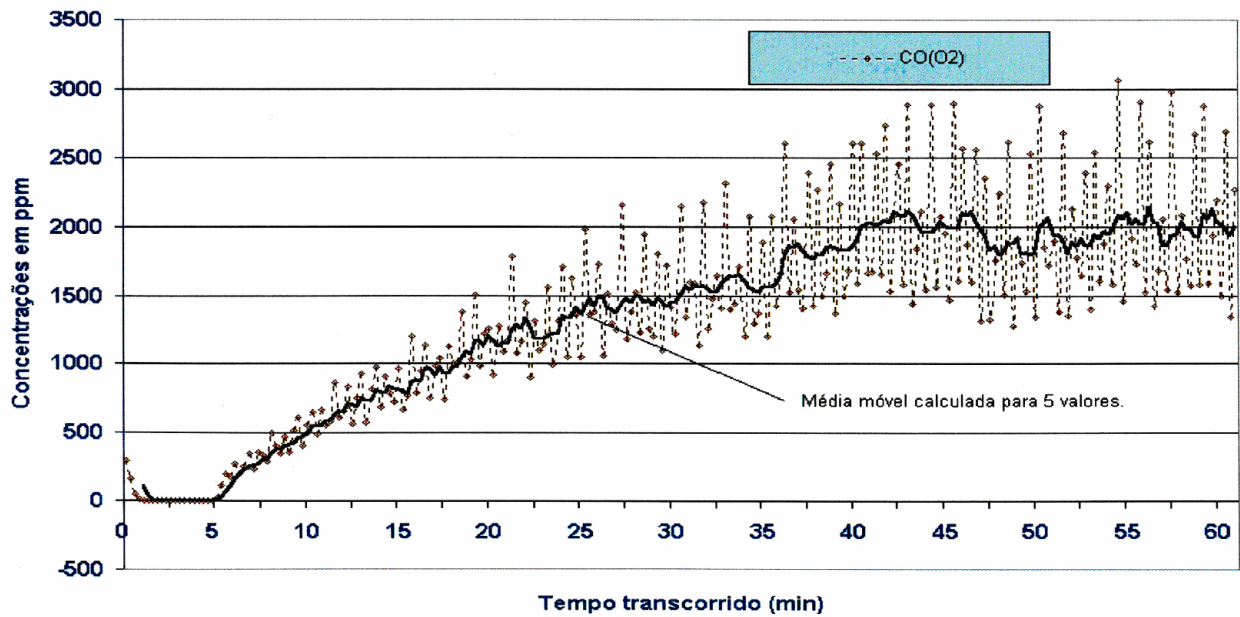


Figura 2.13: Concentrações de CO medidos na exaustão para GLP referidos a 7% de O<sub>2</sub>.

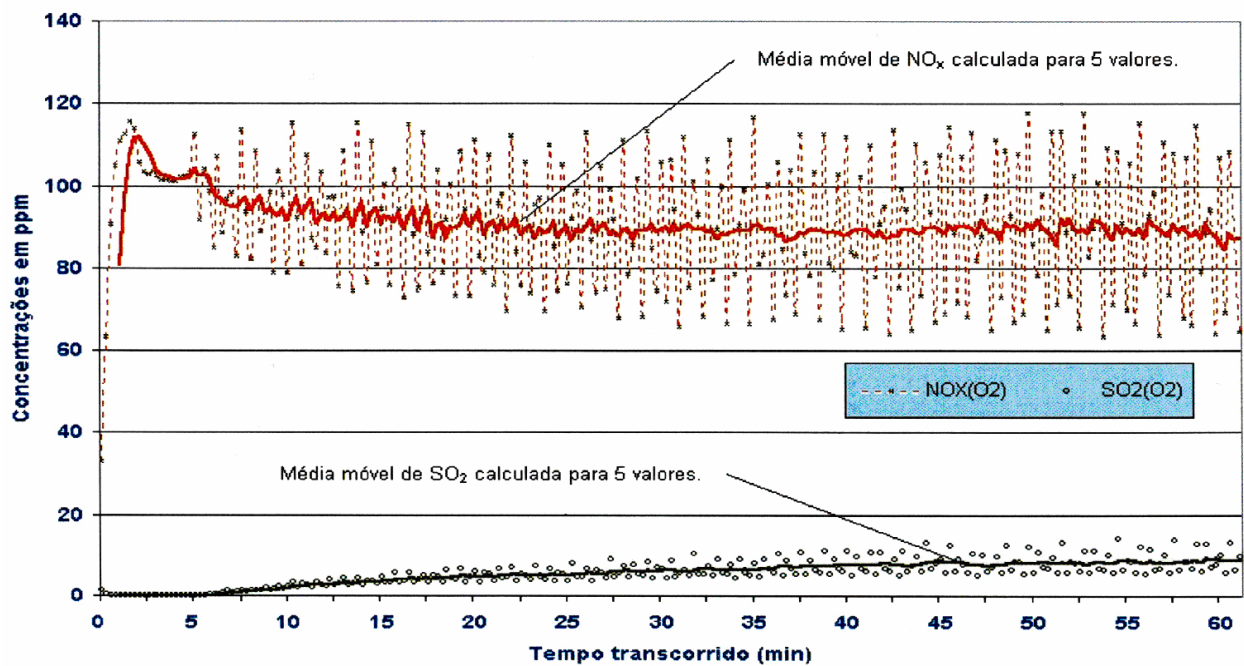


Figura 2.14: Concentrações de NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> medidos na exaustão para GLP referidos a 7% de O<sub>2</sub>.

O tipo de controle utilizado no sistema de combustão de Prochnow (2003) é do tipo clássico liga-desliga (*on-off*). Para possibilitar futuras comparações entre os resultados experimentais das emissões de gases dos sistemas de controle (liga-desliga *versus* controle em malha fechada desenvolvido neste trabalho no Capítulo 6), foi implementado também o controle liga-desliga com o mesmo queimador construído.

### 3. IMPLEMENTAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados os principais tópicos relacionados à descrição geral, modelagem e identificação experimental dos parâmetros dos componentes do sistema de controle e instrumentação do forno.

#### 3.1 Introdução

A implementação experimental do sistema de instrumentação e controle do forno foi realizada no Laboratório de Mecatrônica e Controle do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O forno, com o sistema acoplado, é mostrado na foto apresentada na Figura 3.1.



Figura 3.1: Implementação experimental do sistema de instrumentação e controle do forno.

Os sinais condicionados dos sensores de oxigênio e temperatura são lidos e convertidos pelo microcontrolador. Este processa as informações e atua através das interfaces de potência na válvula pneumática (vazão de gás) e na turbina de ar (vazão de ar), enviando informações para um display e para um banco de dados de um microcomputador. Foram também implementados circuitos próprios de geração de centelha de ignição para início do processo de combustão e de identificação de presença de chama utilizado no esquema de segurança do sistema.

### 3.2 Descrição dos Componentes do Sistema

Os principais componentes do sistema estudado para o controle do forno estão representados no diagrama esquemático da Figura 3.2:

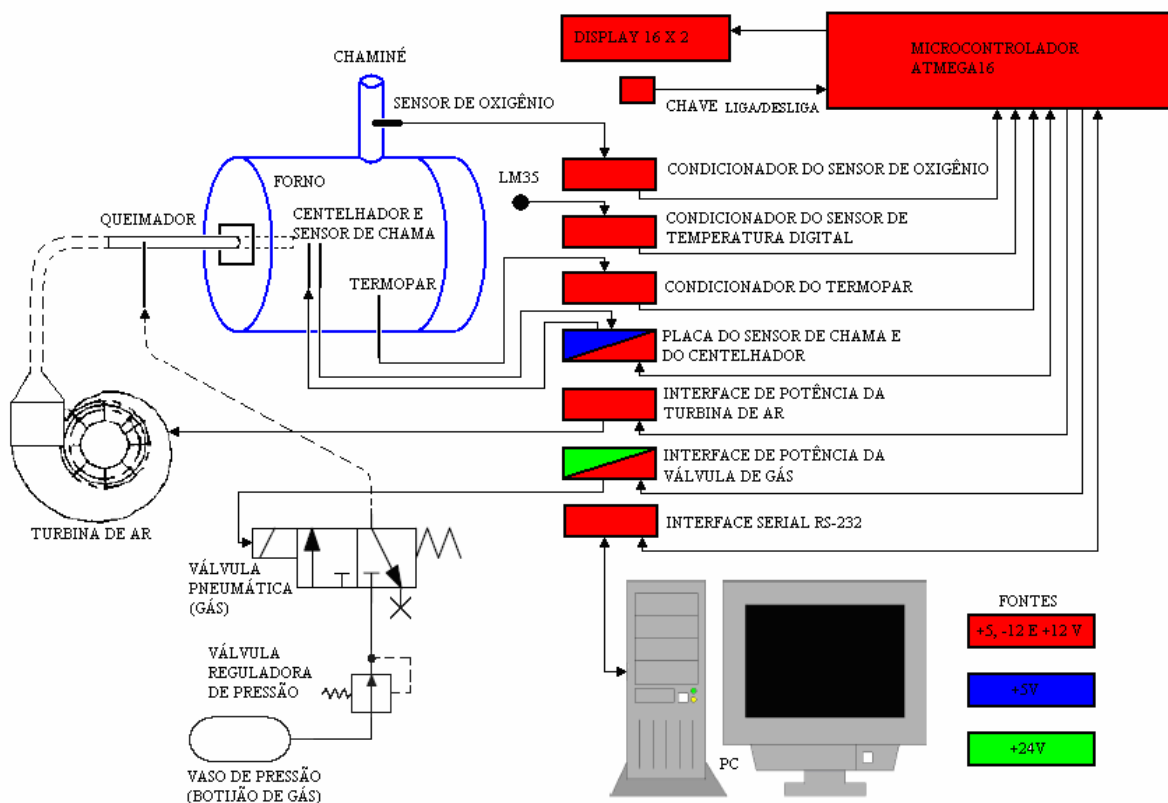


Figura 3.2: Diagrama esquemático das ligações do sistema instrumentação e controle do forno.

Conforme apresentado nas Figuras 3.1 e 3.2, o sistema é constituído pelos seguintes componentes: um forno, um vaso de pressão, uma válvula reguladora de pressão, uma válvula pneumática, uma turbina de ar, um queimador, um sensor de oxigênio de banda larga, um termopar, um sensor de temperatura digital, um sensor de chama, um centelhador, um

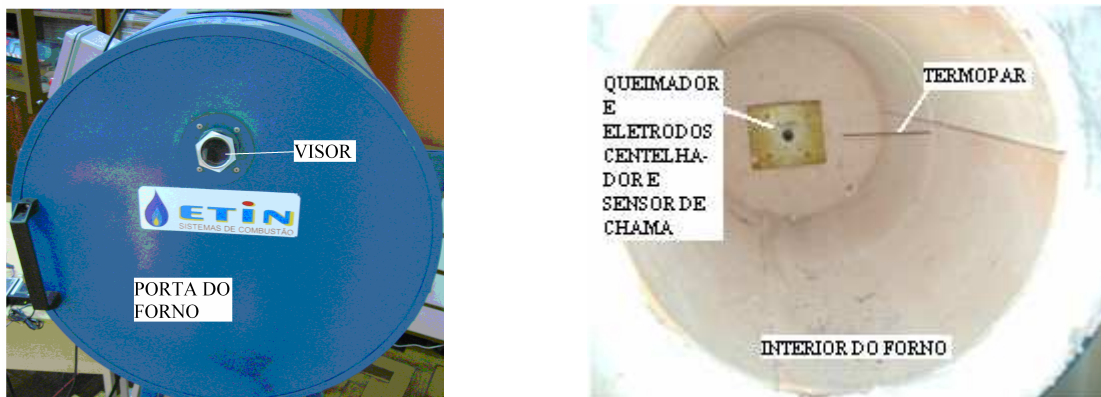
microcontrolador, um display de cristal líquido 16x2, uma chave liga/desliga, uma interface serial RS-232, duas interfaces de potência, três condicionadores de sinais e três fontes chaveadas.

Visando facilitar a sua descrição, o sistema foi dividido em três partes: componentes mecânicos, componentes eletrônicos e sensores. Seguem suas descrições:

### 3.2.1 Componentes Mecânicos

Os componentes mecânicos são: o forno, o vaso de pressão, a válvula reguladora de pressão, a válvula pneumática, a turbina de ar e o queimador.

O forno (Figura 3.3) construído para realizar tratamentos térmicos em peças mecânicas de dimensões reduzidas. Suas medidas externas são: diâmetro de 675 mm, comprimento de 985 mm, medidas internas: diâmetro de 450 mm, comprimento de 740 mm e diâmetro do duto da chaminé de 3,5 pol.



a) Vista frontal do forno.

b) Vista do interior do forno.

Figura 3.3: Fotos do forno utilizado no experimento.

Para armazenar o combustível utilizado no experimento (gás liquefeito de petróleo - GLP), é utilizado como vaso de pressão um botijão de 13 kg doméstico, o qual pode ser facilmente adquirido a um baixo custo. Pelo mesmo motivo, também foi utilizada uma válvula de reguladora de pressão de sistemas domésticos de suprimento de gás.

A válvula pneumática (Figura 3.4) é uma válvula de comutação rápida modelo MHE2-MS1H-3/2-M7-K do fabricante Festo Corporation. Os dados técnicos da válvula estão listados na Tabela 3.1. Sua função no sistema é liberar ou bloquear a passagem de gás para o queimador durante espaços de tempo determinados de acordo com as vazões desejadas, sendo acionada através de uma interface de potência, que, por sua vez, está conectada a um canal PWM (*pulse width modulation*) do microcontrolador, e trabalha na frequência de 30,52 Hz.

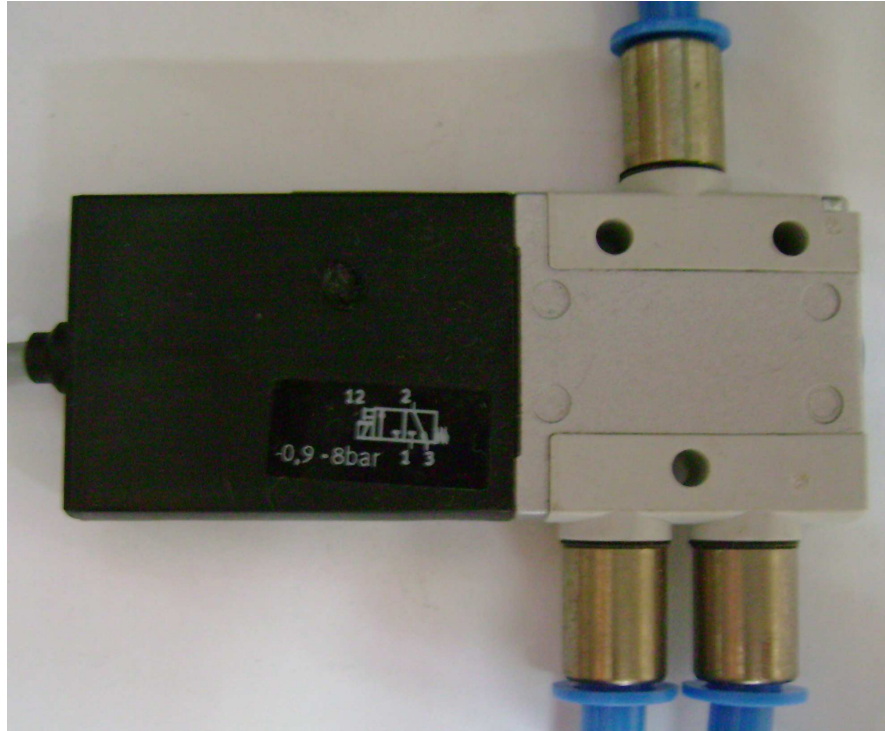


Figura 3.4: Foto da válvula pneumática de acionamento rápido, modelo MHE2-MS1H.

Tabela 3.1: Dados técnicos da válvula MHE2-MS1H-3/2-M7-K.

Máxima Frequência de Utilização	180 Hz
Tempo de Abertura da Válvula	2 ms
Tensão de Alimentação	24 V
Consumo de Potência	5 W
Máxima Vazão	100 l/min

A turbina de ar (Figura 3.5) é um ventilador do fabricante Motorcraft re-aveitados de um sistema de ar condicionado de automóvel. Tem como máxima tensão nominal de trabalho 14 V. Sua função é insuflar o ar para dentro do queimador de acordo com sua rotação. Ela é acionada através de uma interface de potência, que por sua vez está conectada a outro canal PWM do microcontrolador, e trabalha na frequência de 488,28 Hz.

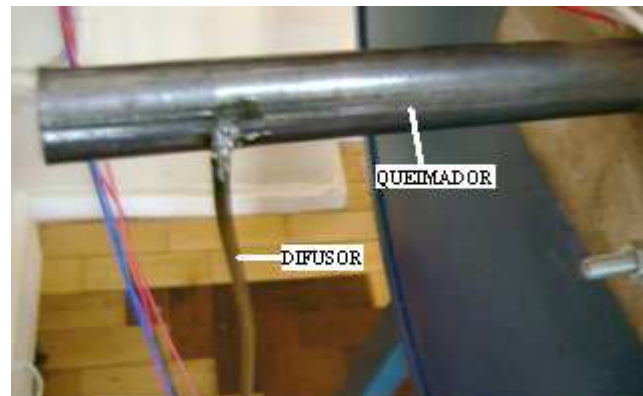




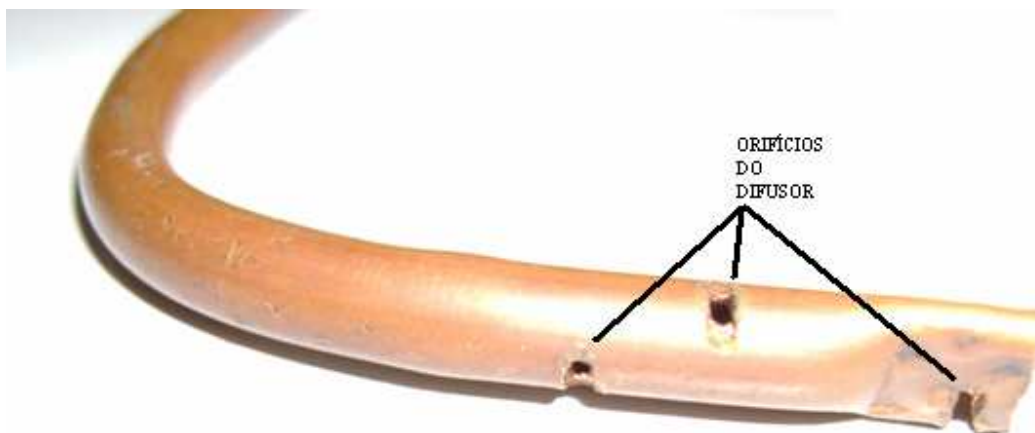
Figura 3.5: Foto da turbina de ar do fabricante Motorcraft utilizada no experimento.



a) Extremidade do queimador com os tubos inseridos paralelamente; eletrodos do sensor de chama e do centelhador.



b) Corpo do queimador com o difusor soldado.



c) Detalhe da construção do difusor.

Figura 3.6: Queimador construído no LAMECC.

### 3.2.2 Sensores

Foram utilizados os seguintes sensores: sensor de oxigênio de banda larga, termopar, sensor de temperatura digital e sensor de chama.

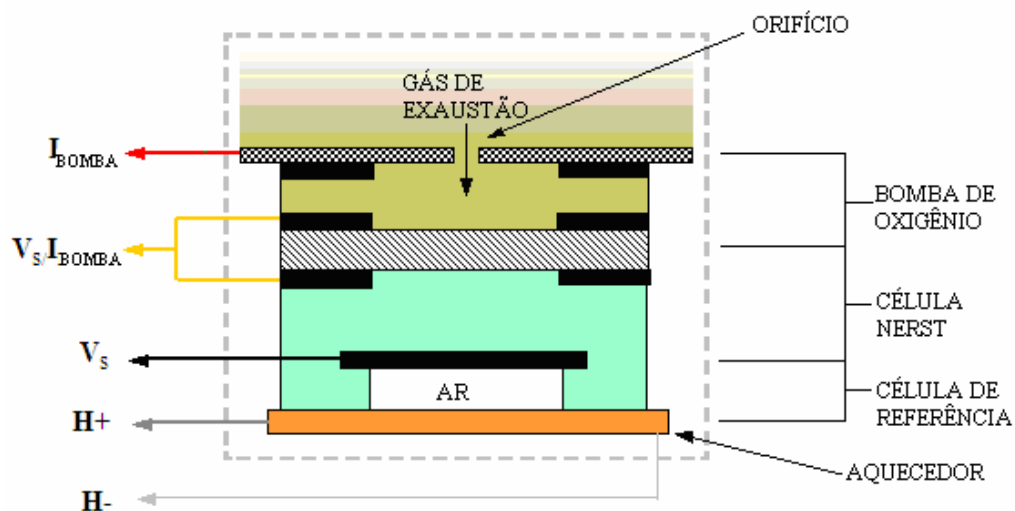
O sensor de oxigênio utilizado é um sensor de oxigênio de banda larga modelo LSU4 do fabricante Bosch. Este sensor é composto de duas partes, a célula de referência Nernst e a célula chamada de *bomba de oxigênio*, coexistindo em um mesmo encapsulamento (vide Figura 3.7). O sensor de oxigênio também contém uma câmara de referência e um elemento de aquecimento. Sua aparência é muito similar à de um sensor de oxigênio comum de automóvel, mas de funcionamento muito mais complexo e preciso. A denominação banda larga se dá ao fato de abranger com precisão e linearidade uma faixa de medição de concentrações de oxigênio muito maior que os sensores automotivos comuns.



a) Sonda lambda de banda larga.



b) Sensor conectado ao duto de chaminé.



c) Esquema construtivo do sensor.

Figura 3.7: O sensor de oxigênio de banda larga modelo LSU4.

O termopar utilizado é do tipo K, podendo medir temperaturas entre  $-200$  e  $1300$  °C e é utilizado para monitorar a temperatura no interior do forno. Sua localização no sistema pode ser observada nas fotos da Figura 3.8.



Figura 3.8: Localização do sensor de temperatura (termopar).

O sensor de temperatura digital é o LM35, do fabricante National Semiconductor Corporation. É um sensor com precisão centígrada, ou seja, é diretamente calibrado linearmente em graus Celsius. O fator de escala é de  $10$  mV/°C, com  $0,5$  °C de precisão. Pode medir temperaturas entre  $-55$  to  $150$  °C e é utilizado para medir a temperatura ambiente, ou seja, a temperatura de junta fria do termopar, necessária para calcular a temperatura do interior do forno.

O circuito do sensor de chama serve para detectar se existe ou não chama no queimador. Os seus eletrodos podem ser observados na Figura 3.6a. O sensor de chama está acoplado ao circuito do centelhador, (este dispositivo foi desenvolvido e construído no LAMECC no âmbito do projeto CONTROLGÁS cujo objetivo é o desenvolvimento de um sistema de controle nacional para aquecedores de passagem). Quando não existe chama no queimador, o ar presente entre os eletrodos atua como isolante e existe uma pequena diferença de potencial entre eles. O valor medido nesta situação é de aproximadamente  $1,5$  V. No caso de ocorrer chama, a atmosfera produzida pela ação do plasma da mesma atua como condutor, ou seja, fecha o circuito entre os eletrodos, levando o valor de tensão para próximo de zero volts.

### 3.2.3 Componentes Eletrônicos

Os componentes eletrônicos são: o centelhador, o microcontrolador, o display de cristal líquido 16x2, a chave liga-desliga, a interface serial RS-232, as interfaces de potência, os condicionadores de sinais e as fontes chaveadas.

O circuito do centelhador serve para formar o arco voltaico (centelha) responsável pelo início da ignição da chama. Esta alta tensão gerada entre os eletrodos do centelhador no interior do forno, aproximadamente 25 KV, é produzida a partir de uma diferença de potencial de 5 V.

O microcontrolador é o modelo ATMEGA16 do fabricante Atmel Corporation e é baseado na arquitetura RISC (*Reduced Instruction Set Computing*) de 131 instruções. Na Tabela 3.2 estão apresentadas algumas das características técnicas do microcontrolador.

Tabela 3.2: Dados técnicos do microcontrolador ATMEGA16.

Memória Flash Programável	16 Kbytes
Ciclos de Gravação	10000 ciclos
Contadores	2 x 8 bits e 1 x 16 bits
Canais PWM	2 x 10 bits e 2 x 8 bits
Entradas Analógicas	8 x 10 bits
Porta de Comunicação Serial	1
Entradas Digitais Programáveis	32
Encapsulamento	40 pinos PDIP
Frequência de Trabalho	0 ~ 16 MHz
Tensão de Operação	4,5 ~ 5,5 V

A chave on/off tem como função permitir ou não o início do processo de controle e monitoração.

O display é o modelo Tech1602b do fabricante Linpo Technology. Apresenta visor com duas linhas e dezesseis colunas. Tem a função de mostrar ao operador do forno as informações de estado de operação (se o mesmo está em estado de inicialização ou operação normal),

temperatura desejada, temperatura atual, temperatura ambiente, valores de vazões de gás e ar atuais e erros devido a situações de funcionamentos anormais.

A interface serial RS-232 é implementada através do circuito integrado MAX-232 do fabricante Texas Instruments. É um duplo transmissor/receptor contendo um gerador de tensão capacitivo para suprir os sinais segundo os níveis da norma TIA/EIA-232-F a partir de um fonte de 5 V. Cada receptor converte os sinais de entrada normalizados TIA/EIA-232-F para os níveis de 5 V de TTL/CMOS. Esses receptores têm como valor de disparo típico 1,3 V e histerese típica de 0,5 V e aceita como entrada valores de até  $\pm 30$  V. Cada transmissor converte as entradas dos níveis TTL/CMOS para os níveis normalizados TIA/EIA-232-F. No tempo de amostragem de 1 s, o microcontrolador envia todos os dados envolvidos no sistema do forno para um microcomputador compatível com IBM-PC, onde os mesmos são armazenados para posterior estudo e pesquisa.

As interfaces de potência são compostas por optoacopladores 4N25 do fabricante Texas Instruments e transistores de potência mosfet IRF640 do fabricante SGS-Thomson Microelectronics. Os optoacopladores têm a função de isolar o microcontrolador dos ruídos gerados pelo chaveamento (acionamento via PWM) das cargas indutivas para a válvula pneumática e para o motor da turbina de ar. Os circuitos integrados IRF640 têm como função acionar as cargas, pois estas, além de possuírem tensões de trabalho diferentes do microcontrolador (a válvula pneumática opera com 24 V e a turbina de ar com 12 V), drenam patamares de correntes muito superiores à máxima corrente de saída das portas do microcontrolador.

O condicionador de sinal utilizado para o sensor de oxigênio de banda larga é o modelo Zt-2 do fabricante Zeitronix, que possui uma saída analógica de 0 a 5 V, conforme a concentração de oxigênio medida pelo sensor. Ele conta também com um display próprio e comunicação serial.

Os condicionadores de sinais utilizados para tratar os sinais do termopar e do sensor de temperatura digital são compostos por dois amplificadores operacionais em série (modelo CA3140 do fabricante Intersil). Devido à sua alta impedância de entrada 1,5 Tohm, o primeiro amplificador operacional atua como buffer de entrada de maneira a não interferir no sinal a ser lido. O segundo amplificador atua como elemento de ajuste da amplitude do sinal. Para o termopar, o ganho de amplificação utilizado é 101 vezes maior do que o valor lido. Para o sensor de temperatura digital o ganho utilizado é de 11 vezes.

Três fontes chaveadas distintas são utilizadas no experimento. A primeira é do tipo utilizada na alimentação de microcomputadores tipo IBM-PC. Esta fornece ao sistema as tensões de +5, -12 e +12 V. Esta fonte alimenta praticamente todo o sistema com exceção da placa do sensor de chama e centelhador e da válvula pneumática.

A segunda fonte é do tipo chaveada utilizada como carregador de bateria de telefone celular da marca Nokia. Ela alimenta com 5 V a placa do sensor de chama e centelhador. Devido ao alto nível de ruídos gerados pelo centelhador, comumente conhecido como PEM (Pulso Eletro-Magnético), é necessário o uso desta fonte para isolar este circuito do restante do sistema. Ao receber a ordem de centelhar do microcontrolador, relés entram em funcionamento e separam os circuitos.

A terceira fonte é do tipo chaveada variável, modelo MPC-303DI do fabricante Minipa, regulada em 24 V. Esta fonte é utilizada para alimentar a válvula pneumática.

## 4. MODELAGEM E IDENTIFICAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentada a modelagem e identificação experimental dos parâmetros envolvidos no funcionamento do forno. Ele se divide da seguinte forma: identificação das características de funcionamento da válvula pneumática, identificação das características de funcionamento da turbina de ar, determinação da faixa operacional do forno, mapeamento das características do forno, identificação das características do sensor de oxigênio, caracterização dos sensores de temperatura e identificação e modelagem dinâmica do sistema.

### 4.1 Identificação das Características de Funcionamento da Válvula Pneumática

A válvula pneumática é acionada através da interface de potência, que, por sua vez, é acionada por um canal PWM do microcontrolador. A válvula é, portanto, acionada por pulsos de larguras diferentes sob um mesmo período, como mostrado na Figura 4.1. Note que  $t_1$  e  $t_2$  são exemplos de duas larguras de pulso distintas.

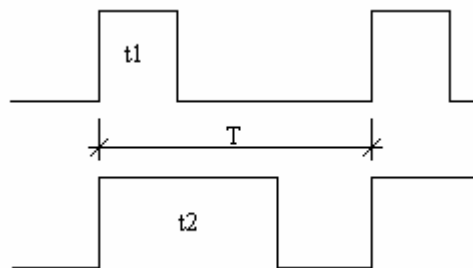


Figura 4.1: Exemplo de diferentes larguras de pulso de um PWM de período  $T$ .

O canal PWM do microcontrolador que aciona a válvula pneumática está configurado para obter 512 larguras de pulsos diferentes. Alterando-se esta largura pode-se alterar o *duty cycle* que é a razão do tempo em que o sinal permanece em nível lógico alto com relação ao período.

Para modelar o funcionamento da válvula pneumática, diferentes valores de largura de pulso foram aplicados à entrada de potência da válvula, permitindo obter na sua saída diferentes medidas de vazões de gás. Através deste procedimento é possível determinar a relação entre a largura do pulso, o tempo de injeção de gás e a vazão de gás.

Os valores de largura de pulso para a vazão de gás foram determinados convenientemente entre o máximo e o mínimo valor necessários para que a chama não se extinguísse por retorno e nem por descolamento. Deve-se ressaltar que a vazão de ar deve ser também cuidadosamente dosada, de maneira a formar uma mistura ar/combustível adequada, capaz de atender aos limites impostos pelo sistema para que a combustão seja mantida. O valor mínimo obtido experimentalmente é de 150 de largura de pulso, o que resulta em 29,30 % de *duty cycle*, ou seja, em 29,30 % do período de duração de cada ciclo a válvula encontra-se em nível lógico alto. O valor máximo obtido é de 330 de largura de pulso, o que resulta em 64,45 % de *duty cycle*.

O medidor de vazão de gás da marca Lao fornece um pulso a cada 0,010 m<sup>3</sup> de gás. Assim, levantou-se as informações que caracterizam a vazão de gás em função do *duty cycle*. A partir destes dados foi possível obter a função que representa o comportamento da válvula pneumática, isto é, a função que relaciona a vazão de gás com a largura de pulso do sinal de acionamento. O gráfico apresentado na Figura 4.2 relaciona estas variáveis e a função é dada por:

$$y = 0.00045983x - 0.028684 \quad (4.1)$$

onde,  $y$  é a vazão de gás em m<sup>3</sup> e  $x$  é a largura de pulso.

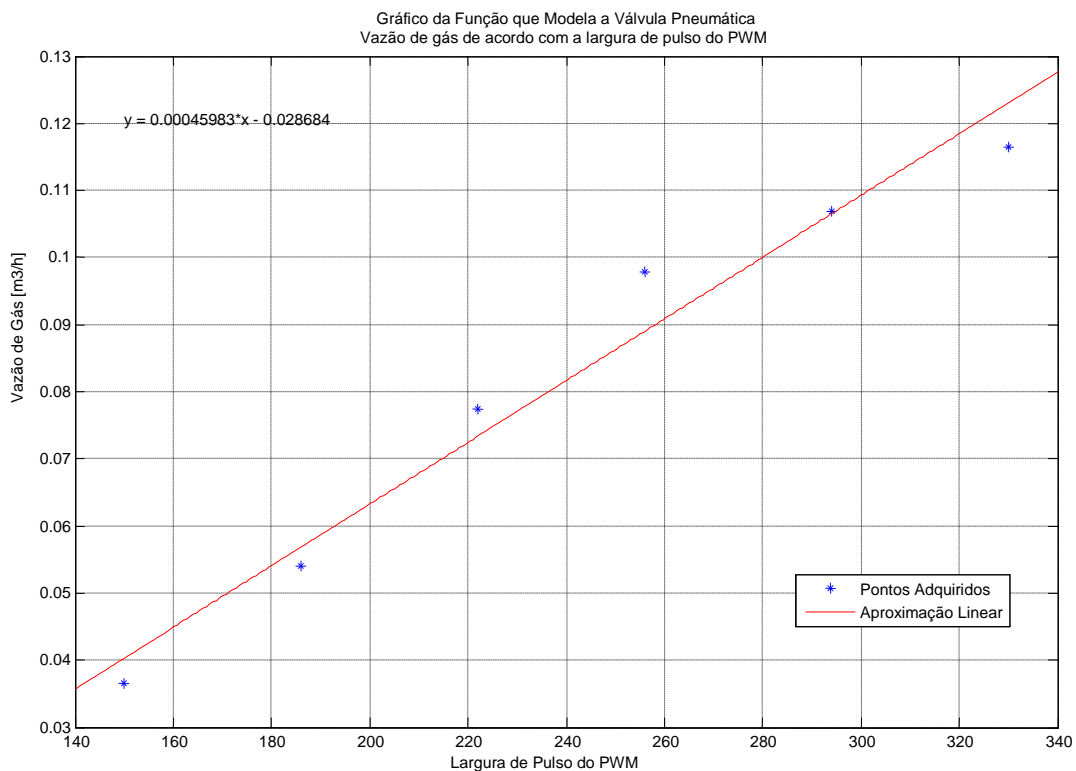


Figura 4.2: Gráfico da vazão de gás *versus* largura de pulso do sinal de acionamento.



## 4.2 Identificação das Características de Funcionamento da Turbina de Ar

Assim como a válvula de controle da vazão de gás, a turbina de ar também é acionada por um canal PWM do microcontrolador e, a exemplo do que ocorre no caso da válvula pneumática, o canal PWM do microcontrolador que aciona a turbina de ar está configurado para 256 larguras de pulsos diferentes. Assim, para modelar o funcionamento da turbina de ar, diferentes valores de largura de pulso foram aplicados à entrada de potência da turbina, permitindo obter diferentes medidas de vazões de ar. Através deste procedimento foi possível determinar a relação entre a largura dos pulsos e a vazão de ar.

Os valores de largura de pulso para a vazão de ar foram também determinados experimentalmente de forma a manterem-se entre os valores máximo e mínimo necessários para que a chama não se extinguisse por retorno e nem por descolamento. Deve-se destacar que, ao contrário do caso anterior, onde controlava-se a vazão de ar, neste caso é a vazão de gás que é cuidadosamente modulada de maneira a formar uma mistura ar/combustível adequada, capaz de manter a chama acesa, dentro dos limites do sistema. O valor mínimo obtido de largura de pulso é de 40, que resulta em 15,62 % de *duty cycle*, e o máximo valor obtido é de 90 de largura de pulso que resulta em 35,16 % de *duty cycle*.

Com o medidor de vazão de ar automotivo da marca Bosch, foi possível obter a função que representa o comportamento da turbina de ar, ou seja, a função que fornece a vazão de ar de acordo com a largura de pulso do sinal de controle, o gráfico apresentado na Figura 4.3 relaciona estas variáveis e a função é dada por:

$$y = 0.037489x + 2.7473 \quad (4.2)$$

onde,  $y$  é a vazão de ar em  $\text{m}^3$  e  $x$  é a largura de pulso.

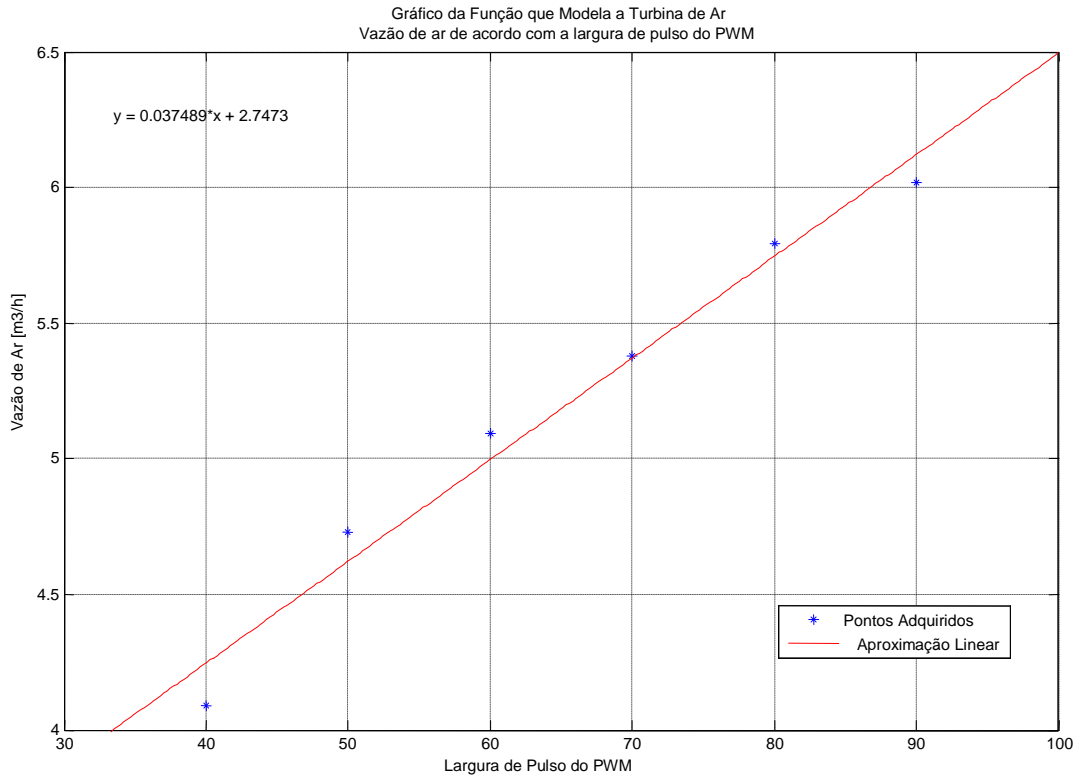


Figura 4.3: Vazão de ar *versus* largura de pulso do sinal de acionamento da turbina de ar.

### 4.3 Determinação da Faixa Operacional do Forno

Com os valores máximos e mínimos das vazões de gás e de ar definidos, foi possível organizar uma tabela com combinações de diferentes valores de vazões visando verificar as situações de continuidade ou de extinção da chama, conforme dados ilustrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Combinações de vazões de ar e gás.

Vazão de Ar [m <sup>3</sup> /h]							
1	6,0179	Extinguiu	Extinguiu	Extinguiu	Extinguiu	Extinguiu	Permaneceu
2	5,7939	Extinguiu	Extinguiu	Extinguiu	Extinguiu	Permaneceu	Permaneceu
3	5,3793	Extinguiu	Extinguiu	Extinguiu	Permaneceu	Permaneceu	Permaneceu
4	5,0942	Extinguiu	Extinguiu	Permaneceu	Permaneceu	Permaneceu	Permaneceu
5	4,7299	Extinguiu	Permaneceu	Permaneceu	Permaneceu	Permaneceu	Extinguiu
6	4,0891	Permaneceu	Permaneceu	Permaneceu	Permaneceu	Extinguiu	Extinguiu
		0,0365	0,054	0,0774	0,0978	0,107	0,1165
		1	2	3	4	5	6
		Vazão de Gás [m <sup>3</sup> /h]					

Através das informações da Tabela 4.1, pôde-se observar que as células destacadas (em vermelho) são as combinações de vazões de ar e combustível em que a chama permanece acesa. Nas combinações restantes a chama extingue-se. Estas células destacadas determinam a faixa operacional do forno, ou seja, nesta faixa a combustão é garantida, enquanto que a chama será extinta em combinações de vazões fora desta região.

#### 4.4 Mapeamento das Características do Forno

O mapeamento das características do forno em toda a faixa operacional foi determinada pelas combinações de vazão de ar e de gás (em vermelho da Tabela 4.1).

Para realizar as medições necessárias à determinação das características do forno foi utilizado um analisador portátil de gases de combustão, modelo Ecoline4000, do fabricante Eurotron aferido e calibrado, conforme seus certificados de conformidade e calibração. Na Tabela 4.2 estão apresentadas as características técnicas do analisador utilizado.

Tabela 4.2. Características técnicas do analisador de gases de combustão Ecoline4000.

Parâmetro	Tipo de Sensor	Faixa	Resolução	Tempo de Resposta	Limite de Erro
O <sub>2</sub>	Eletroquímico	0 a 25 [%]	0,1 [% vol.]	20 [s]	±0,1 [% vol]
CO	Eletroquímico	0 a 20000 [ppm]	1 [ppm]	40 [s]	±10 [ppm] < 300 [ppm] ±4 [%] Leit. Até 2000 [ppm] ±10 [%] Leit. > 2000 [ppm]
NO	Eletroquímico	0 a 4000 [ppm]	1 [ppm]	40 [s]	±5 [ppm] < 125 [ppm] ±4 [%] Leit. > 125 [ppm]
NO <sub>x</sub>	Calculado	0 a 5000 [ppm]	1 [ppm]		
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	Pelistor	0 a 5 [%] Metano	0,01 [%]	80 [s]	±5 do final de escala
CO <sub>2</sub>	Calculado	0 a 100 [%]	0,1 [%]		

Para o mapeamento do sistema do forno foram realizadas medições dos gases de combustão para cada uma das dezoito configurações da faixa operacional. Verificou-se que após o forno ser inicializado, períodos entre 120 e 150 min, dependendo da combinação, devem ser aguardados para garantir que o mesmo opere em regime permanente de forma que a emissão dos gases resultantes da combustão estejam estabilizados. Assim, depois de cada estabilização do forno, iniciaram-se os registros de gases de exaustão, que foram tomadas por períodos de 20 min a uma taxa de amostragem de 30 s, resultando em um total de 41 medidas, os registros foram

tomados manualmente. Este procedimento está de acordo com a recomendação do fabricante de que o analisador de gases não deve efetuar medições em um intervalo contínuo maior que 120 min, pois isto pode danificar os sensores eletroquímicos. Para cada parâmetro medido pelo analisador de gases foi organizada uma tabela com os valores médios adquiridos.

Na Tabela 4.3 e através do gráfico apresentado na Figura 4.4 pode-se observar os valores médios das concentrações de O<sub>2</sub> % para as diferentes combinações de vazões de gás e ar aplicadas ao forno.

Tabela 4.3. Valores médios das concentrações de O<sub>2</sub> em %.

Vazão de Ar [m <sup>3</sup> /h]							
1	6,0179	0	0	0	0	0	9,6636
2	5,7939	0	0	0	0	10,6909	9,1818
3	5,3793	0	0	0	11,5727	10,4904	8,1727
4	5,0942	0	0	12,2636	10,3091	8,6818	7,3727
5	4,7299	0	12,8818	11,8364	10,4818	7,5364	0
6	4,0891	13,4818	10,9273	8,6091	6,6727	0	0
		0,0365	0,054	0,0774	0,0978	0,107	0,1165
		1	2	3	4	5	6
		Vazão de Gás [m <sup>3</sup> /h]					

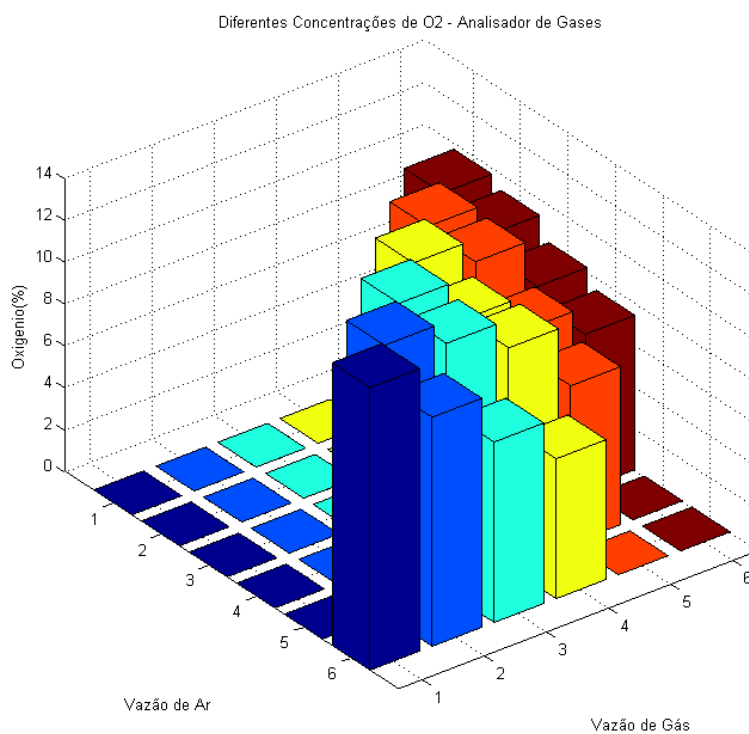


Figura 4.4: Valores médios das concentrações de O<sub>2</sub> em %.

Na Tabela 4.4 e através do gráfico apresentado na Figura 4.5 pode-se observar os valores médios das concentrações de CO<sub>2</sub> para as diferentes combinações de vazões de gás e ar aplicadas ao forno.

Tabela 4.4. Valores médios das concentrações de CO<sub>2</sub> em %.

Vazão de Ar [m <sup>3</sup> /h]							
1	6,0179	0	0	0	0	0	8,4455
2	5,7939	0	0	0	0	7,6909	8,8273
3	5,3793	0	0	0	7,0182	7,8364	9,5727
4	5,0942	0	0	6,5182	7,9909	9,1909	10,1818
5	4,7299	0	6,0273	6,8182	7,8273	10,0545	0
6	4,0891	5,5727	7,5091	9,2364	10,7091	0	0
		0,0365	0,054	0,0774	0,0978	0,107	0,1165
		1	2	3	4	5	6
		Vazão de Gás [m <sup>3</sup> /h]					

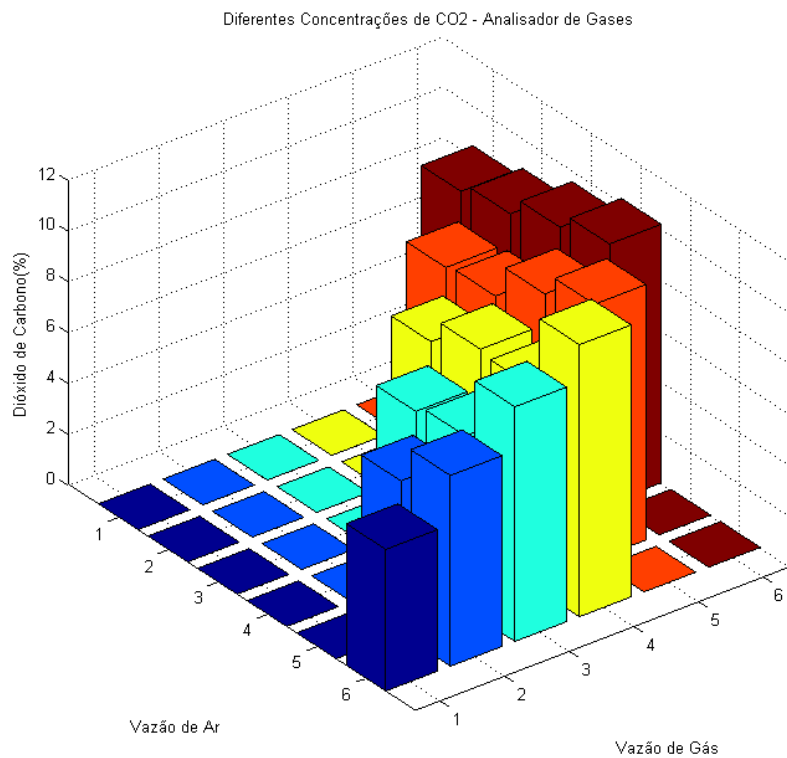


Figura 4.5: Valores médios das concentrações de CO<sub>2</sub> em %.

Na Tabela 4.5 e através do gráfico apresentado na Figura 4.6 pode-se observar os valores médios das concentrações de CO para as diferentes combinações de vazões de gás e ar aplicadas ao forno.

Tabela 4.5. Valores médios das concentrações de CO em ppm.

Vazão de Ar [m <sup>3</sup> /h]							
1	6,0179	0	0	0	0	0	48,8182
2	5,7939	0	0	0	0	46,7273	46
3	5,3793	0	0	0	29,6364	34,5455	27,5455
4	5,0942	0	0	14,4545	23	26,7273	21,3636
5	4,7299	0	16,2727	22,6364	23,0909	60,5455	0
6	4,0891	29,2727	24,7273	17,3636	24,7273	0	0
		0,0365	0,054	0,0774	0,0978	0,107	0,1165
		1	2	3	4	5	6
		Vazão de Gás [m <sup>3</sup> /h]					

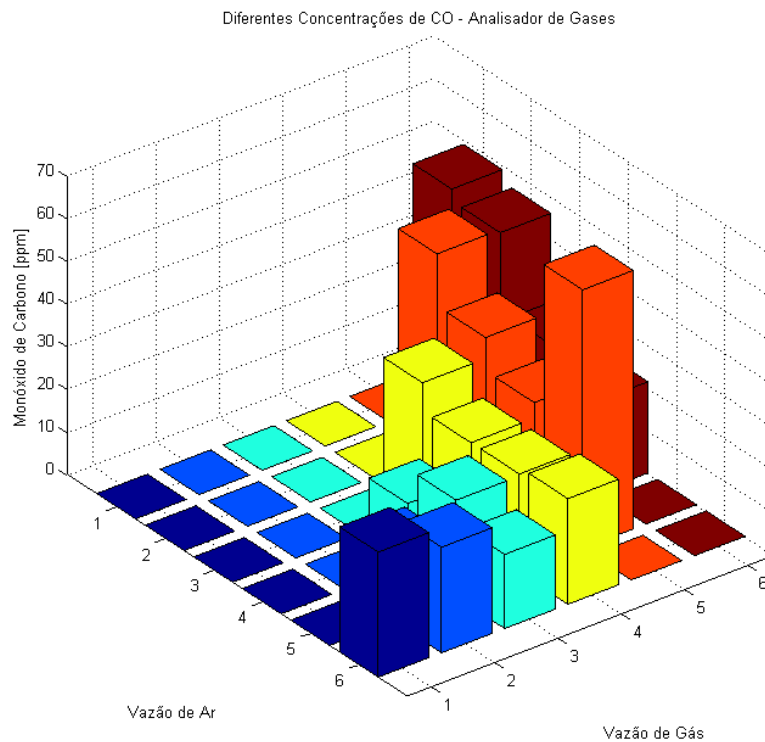


Figura 4.6: Valores médios das concentrações de CO em ppm.

Na Tabela 4.6 e através do gráfico apresentado na Figura 4.7 pode-se observar os valores médios das concentrações de NO para as diferentes combinações de vazões de gás e ar aplicadas ao forno.

Tabela 4.6. Valores médios das concentrações de NO em ppm.

Vazão de Ar [m <sup>3</sup> /h]							
1	6,0179	0	0	0	0	0	78,0909
2	5,7939	0	0	0	0	76,0909	75,3636
3	5,3793	0	0	0	68,5455	67,2727	51,3636
4	5,0942	0	0	50,4545	49,9091	40,5455	35,3636
5	4,7299	0	32,5455	28,1818	23,0909	12,7273	0
6	4,0891	44,8182	32,2727	22,4545	16,0909	0	0
		0,0365	0,054	0,0774	0,0978	0,107	0,1165
		1	2	3	4	5	6
		Vazão de Gás [m <sup>3</sup> /h]					

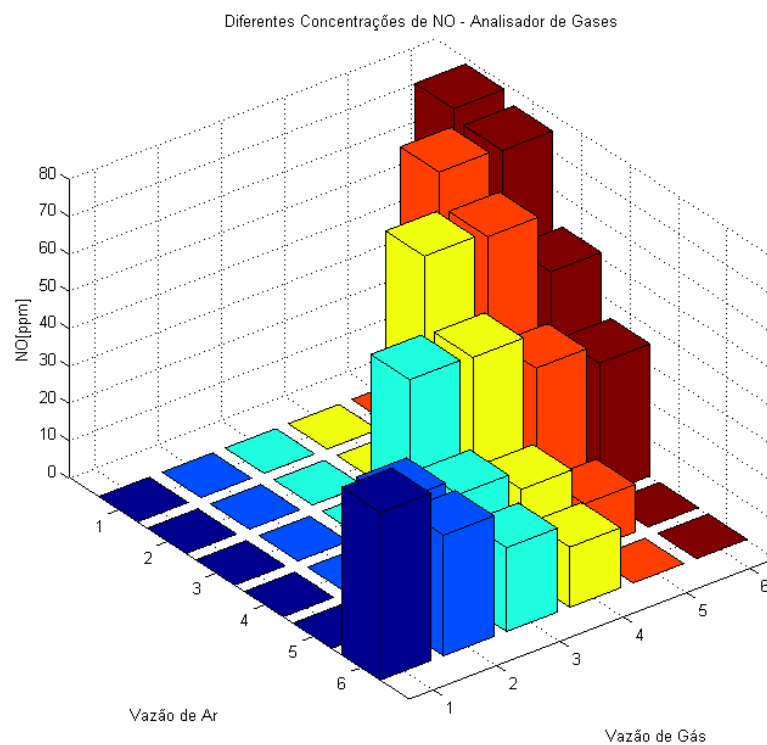


Figura 4.7: Valores médios das diferentes concentrações de NO em ppm.

Na Tabela 4.7 e através do gráfico apresentado na Figura 4.8 pode-se observar os valores médios das concentrações de  $\text{NO}_x$  para as diferentes combinações de vazões de gás e ar aplicadas ao forno.

Tabela 4.7. Valores médios das concentrações de  $\text{NO}_x$  em ppm.

Vazão de Ar [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]							
1	6,0179	0	0	0	0	0	80,0909
2	5,7939	0	0	0	0	78,6364	77,6364
3	5,3793	0	0	0	70,5455	69,4545	52,9091
4	5,0942	0	0	52,0909	51,5455	41,8182	36,3636
5	4,7299	0	33,6364	29	23,8182	13	0
6	4,0891	46,3636	33,2727	23,0909	16,5455	0	0
		0,0365	0,054	0,0774	0,0978	0,107	0,1165
		1	2	3	4	5	6
		Vazão de Gás [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]					

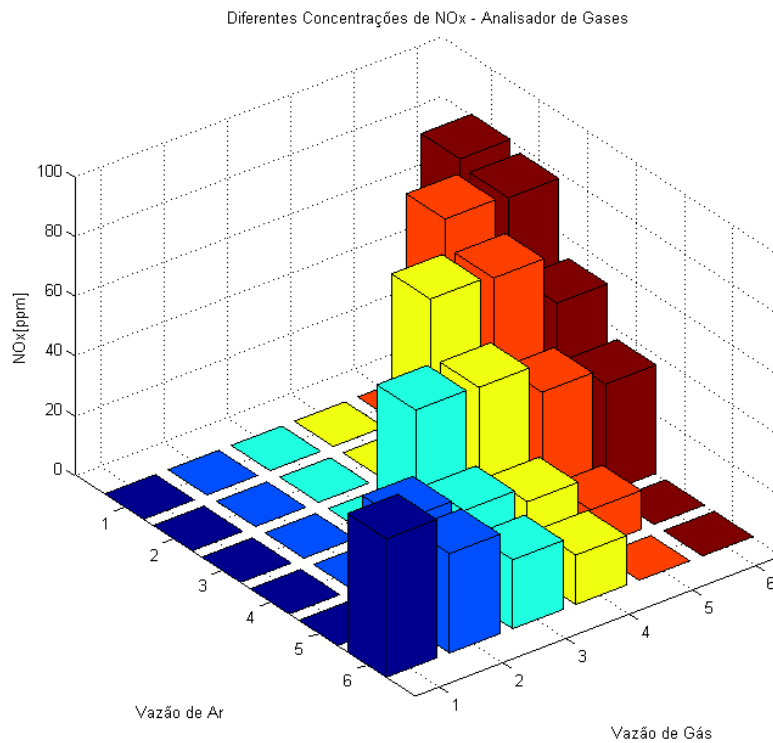


Figura 4.8: Valores médios das concentrações de  $\text{NO}_x$  em ppm.



Na Tabela 4.8 e através do gráfico apresentado na Figura 4.9 pode-se observar os valores médios das concentrações de HC para as diferentes combinações de vazões de gás e ar aplicadas ao forno.

Tabela 4.8. Valores médios das concentrações de HC em %.

Vazão de Ar [m <sup>3</sup> /h]							
1	6,0179	0	0	0	0	0	0
2	5,7939	0	0	0	0	0	0
3	5,3793	0	0	0	0	0	0
4	5,0942	0	0	0,0432	0,0378	0,0265	0
5	4,7299	0	0,0096	0,0141	0,0237	0,3345	0
6	4,0891	1,4557	1,2724	1,192	1,1089	0	0
		0,0365	0,054	0,0774	0,0978	0,107	0,1165
		1	2	3	4	5	6
		Vazão de Gás [m <sup>3</sup> /h]					

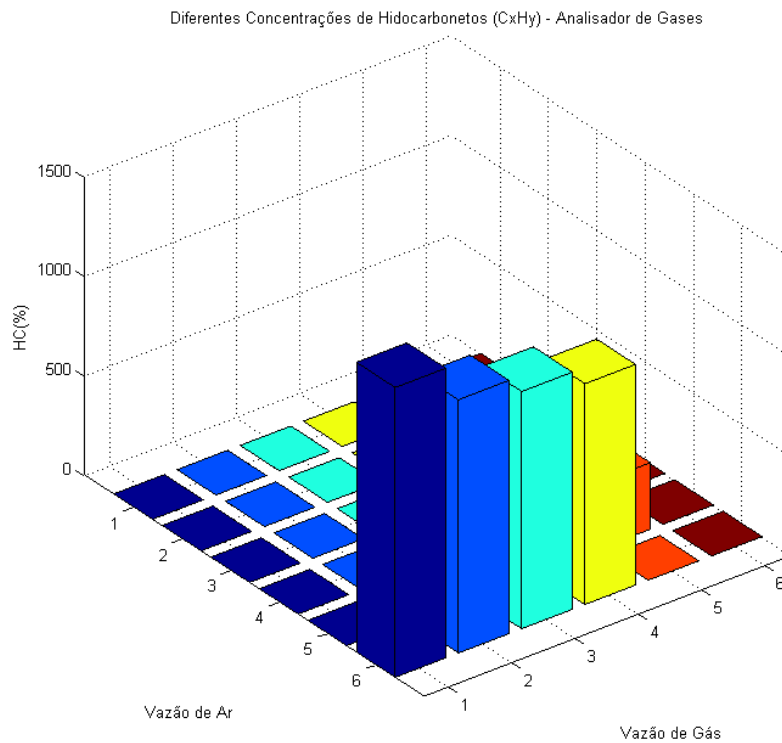


Figura 4.9: Valores médios das concentrações de HC em %.

As informações de temperatura do ambiente e do interior do forno e de concentração de O<sub>2</sub> realizadas através do sistema de conversão analógico/digital do microcontrolador foram enviadas via RS-232 para o microcomputador e registradas integralmente.

#### 4.5 Identificação das Características do Sensor de Oxigênio

O condicionador do sensor de oxigênio de banda larga tem como sinal de saída uma tensão entre 0 e 5 V. O conversor analógico-digital do microcontrolador conta com 10 bits para converter o valor lido, o que corresponde a 1024 valores com uma resolução de 4,89 mV.

Para identificar as características deste sensor foram utilizados os diferentes valores de concentrações de oxigênio obtidos no mapeamento do forno realizado com o analisador de gases. Os valores medidos a uma taxa de amostragem de 1 s, foram armazenados em um microcomputador através do envio dos dados via RS-232.

Os valores médios das curvas obtidas através do sensor para cada valor do mapeamento (Tabela 4.9), foram utilizados para a realização de um ajuste baseado em mínimos quadrados (Figura 4.10) para adequar o valor lido em decimal para o valor de concentração de O<sub>2</sub> em %. Esta curva foi, assim, ajustada através de um polinômio de terceiro grau dado por:

$$y = -2.6505 \times 10^{-6} x^3 + 0.0068997 x^2 - 6.0618 x + 1855.4 \quad (4.3)$$

onde,  $y$  é o valor do ajuste e  $x$  é o valor lido no A/D do microcontrolador em decimal.

Tabela 4.9. Valores médios (em decimal) das curvas obtidas diretamente do sensor.

Vazão de Ar [m <sup>3</sup> /h]							
1	6,0179	0	0	0	0	0	730
2	5,7939	0	0	0	0	756	719
3	5,3793	0	0	0	780	753	698
4	5,0942	0	0	794	746	708	677
5	4,7299	0	813	783	752	671	0
6	4,0891	833	766	707	663	0	0
		0,0365	0,054	0,0774	0,0978	0,107	0,1165
		1	2	3	4	5	6
		Vazão de Gás [m <sup>3</sup> /h]					

Foi realizada também a comparação dos valores das concentrações de O<sub>2</sub> adquiridos através do analisador de gases e do sensor de oxigênio. A Figura 4.11 ilustra essa comparação.

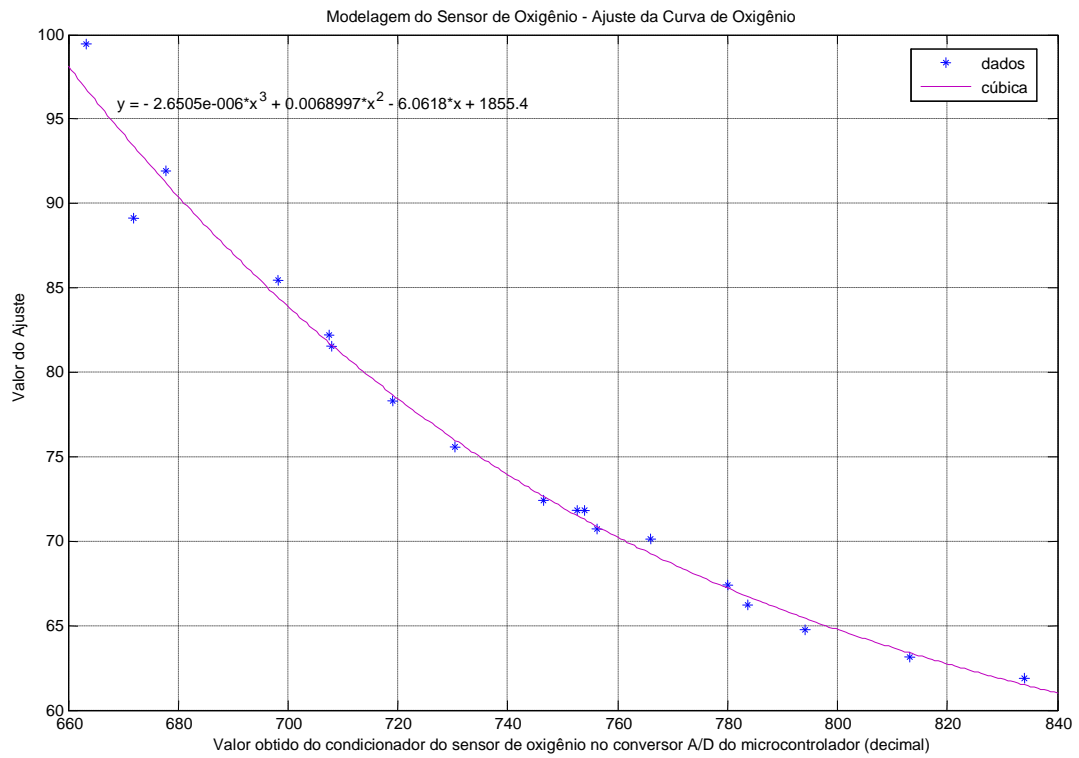


Figura 4.10: Curva representativa do comportamento do sensor de oxigênio.

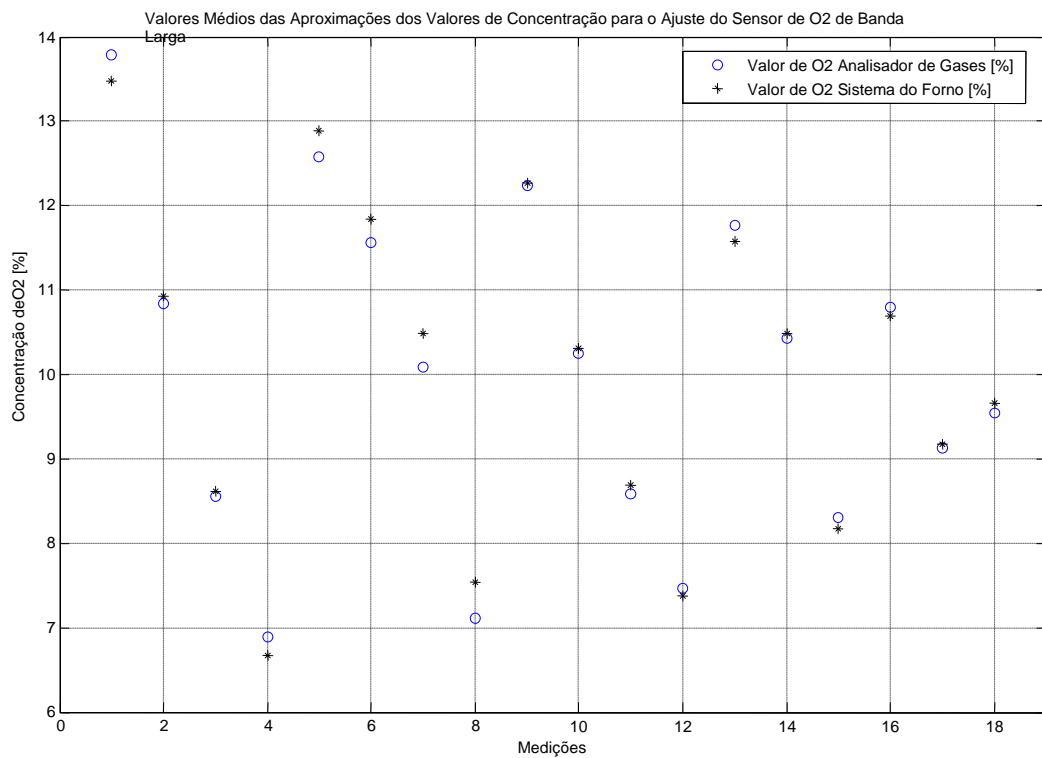


Figura 4.11: Concentrações de O<sub>2</sub> lidas pelo analisador de gases e pelo sensor de oxigênio.

O valor lido pelo sensor de O<sub>2</sub> decimal é a variável independente do polinômio de ajuste. A concentração de O<sub>2</sub> ajustada é obtida pela razão do valor lido em relação ao polinômio de ajuste.

O processo de calibração realizado torna o valor lido através do conjunto sensor-condicionador de O<sub>2</sub> totalmente compatível com a leitura realizada pelo analisador de gases.

#### 4.6 Caracterização dos Sensores de Temperatura

Os sensores de temperatura apresentam comportamento aproximadamente linear na faixa de aplicação, assim é necessária apenas a determinação de uma aproximação linear, conforme apresentado nas figuras 4.12 e 4.13.

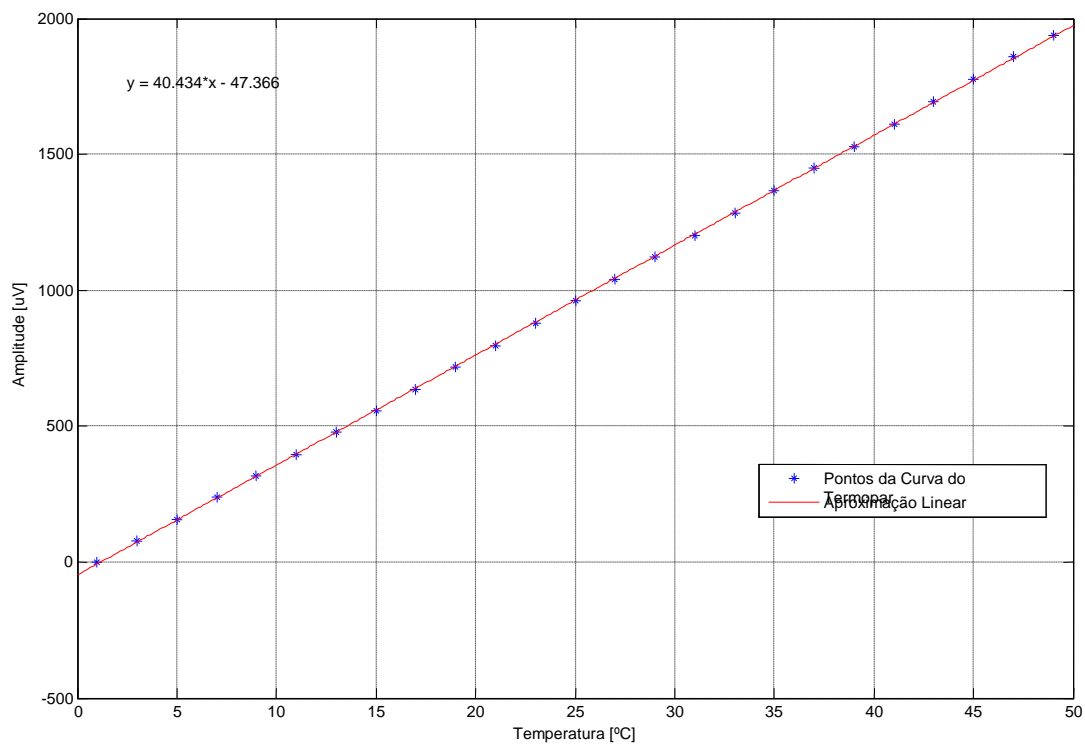


Figura 4.12: Aproximação linear realizada °C para uV através da tabela do termopar tipo K.

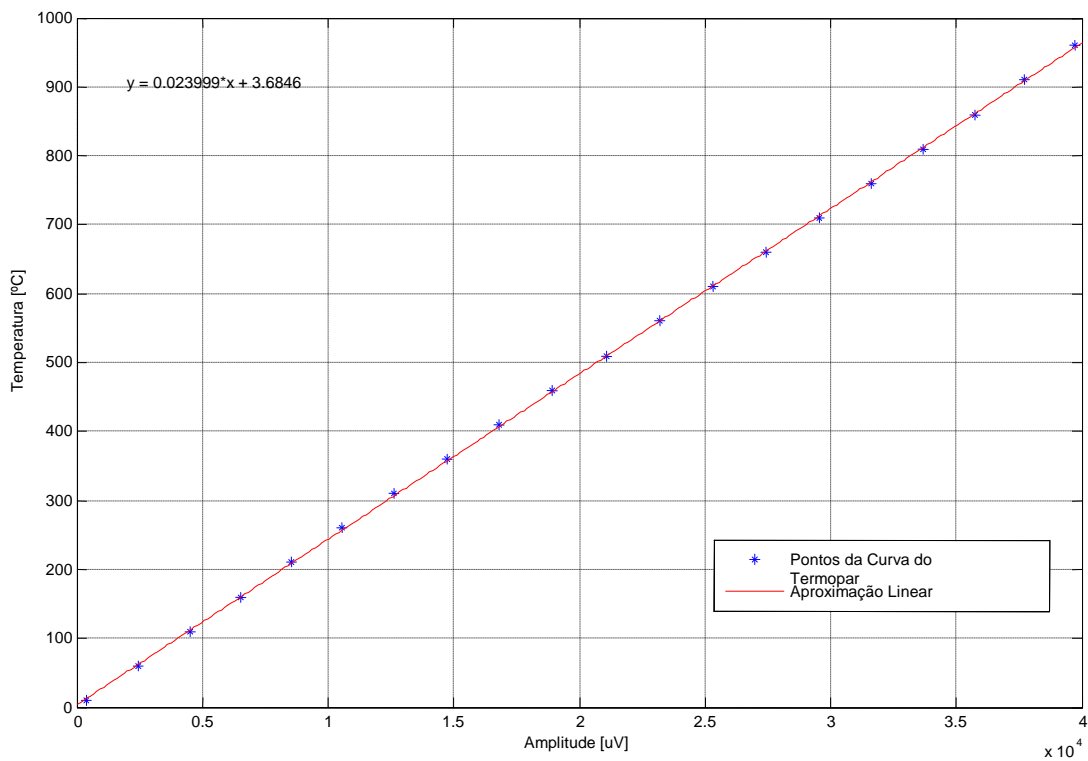


Figura 4.13: Aproximação linear uV para °C realizada através da tabela do termopar tipo K.

Através da curva da Figura 4.12 obtém-se o valor em uV correspondente à temperatura ambiente medida pelo sensor LM35, determinando-se a temperatura da junta fria do termopar através da temperatura ambiente em °C lida diretamente no sensor LM35 e transformando-a em uV, dada pela aproximação linear:

$$y = 40.434x - 47.366 \quad (4.4)$$

onde,  $x$  é a temperatura em °C e  $y$  é o valor em uV resultante.

A temperatura no interior do forno é obtida somando-se o valor em uV resultante da curva apresentada na Figura 4.12. Com o valor totalizado em uV, aplica-se a curva de aproximação linear do termopar (Figura 4.13) para obter o valor em °C, que é dada por:

$$y = 0.023999x + 3.6846 \quad (4.5)$$

onde,  $x$  é o valor em uV e  $y$  é a temperatura em °C resultante.

Ambas as curvas foram retiradas de uma tabela de valores para termopar do tipo K. A devida calibração foi realizada em dois pontos para ambos sensores, a zero grau e no ponto de ebulição da água (98,6 °C em Porto Alegre), e sendo assim, um pequeno offset inserido na

programação do microcontrolador com a finalidade de compensar as pequenas diferenças entre as medidas.

#### 4.7 Identificação e Modelagem Dinâmica do Sistema

Para a modelagem dinâmica do sistema foram escolhidas duas situações operacionais onde as relações de mistura ar/combustível resultaram nas menores quantidades de emissões de gases poluentes, conforme pode ser observado nas tabelas e gráficos dos dados obtidos no mapeamento das características do forno na seção 4.4.

Assim, as duas relações de misturas ar/combustível escolhidas para a modelagem dinâmica foram: a primeira, de 50 de largura de pulso de ar com 186 de largura de pulso de gás, que resultam nas vazões de  $4,7299 \text{ m}^3/\text{h}$  de ar com  $0,0540 \text{ m}^3/\text{h}$  de gás e a segunda relação, de 50 de largura de pulso de ar com 256 de largura de pulso de gás, que resultam nas vazões de  $4,7299 \text{ m}^3/\text{h}$  de ar com  $0,0978 \text{ m}^3/\text{h}$  de gás.

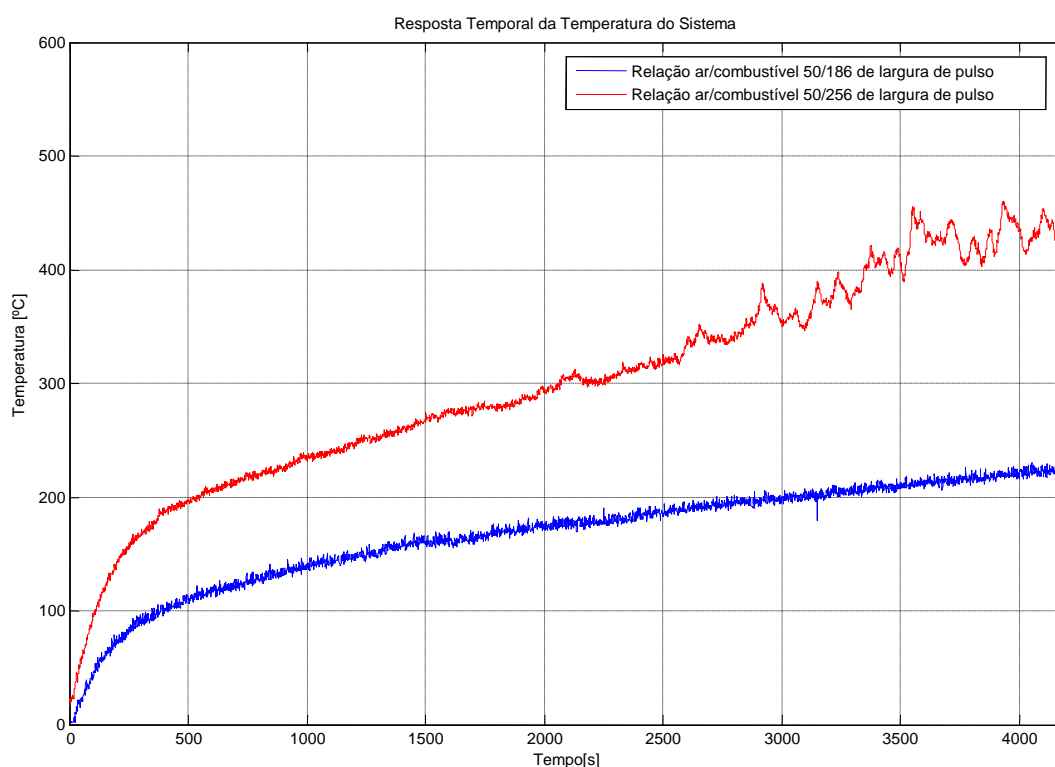


Figura 4.14: Resposta no tempo da temperatura para as relações ar/combustível medidas.

Para cada uma das duas relações acima foram levantados os dados das curvas de resposta no tempo, tanto para a temperatura como para a concentração de  $\text{O}_2$ . Na Figura 4.14 pode-se observar as duas curvas selecionadas.

Uma função de transferência de primeira ordem foi aproximada através da média das respostas das duas situações estabelecidas. Esta aproximação foi feita através da média de modo a não privilegiar nem uma situação nem outra.

Na Figura 4.15 pode-se observar as respostas medidas do forno e a resposta do modelo teórico com a aproximação da função de transferência de primeiro grau da temperatura devidamente ajustada, dada por:

$$T(s) = \frac{1.3117}{1500s + 1} \quad (4.6)$$

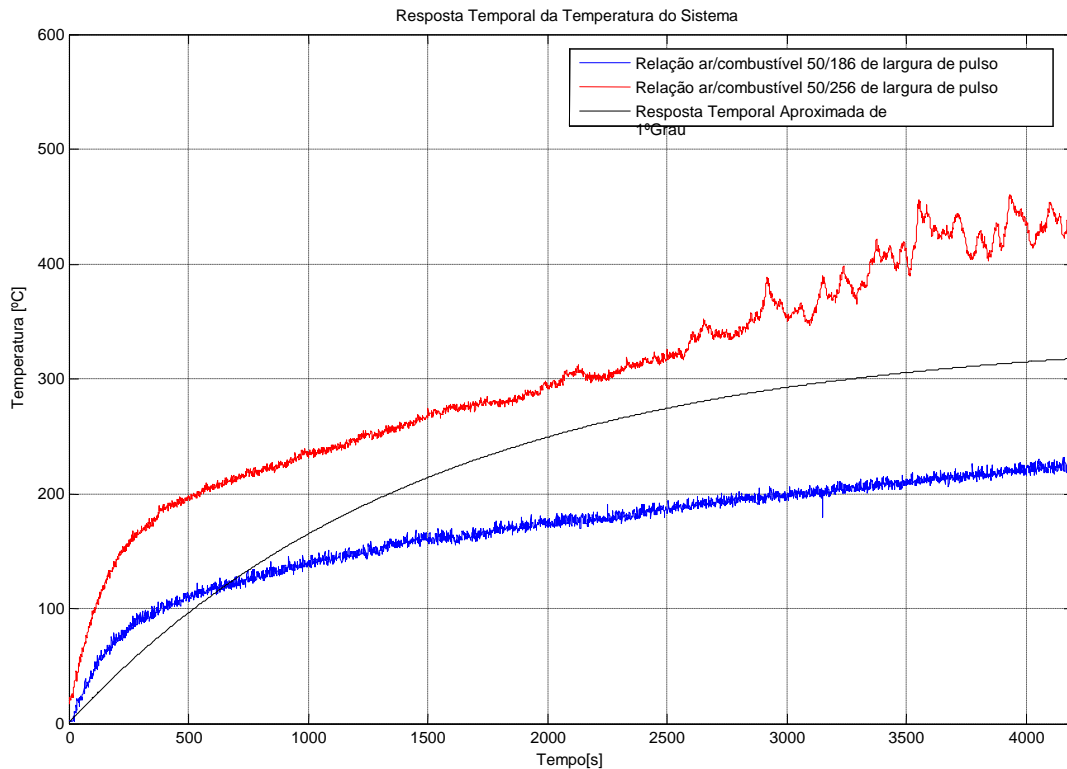


Figura 4.15: Comparativo entre as respostas levantadas experimentalmente e a resposta do modelo teórico.

Para a modelagem da concentração de oxigênio do sistema adotou-se o mesmo procedimento utilizado na modelagem da resposta de temperatura.

Na Figura 4.16 pode-se observar as duas curvas das respostas de concentração de oxigênio do sistema.

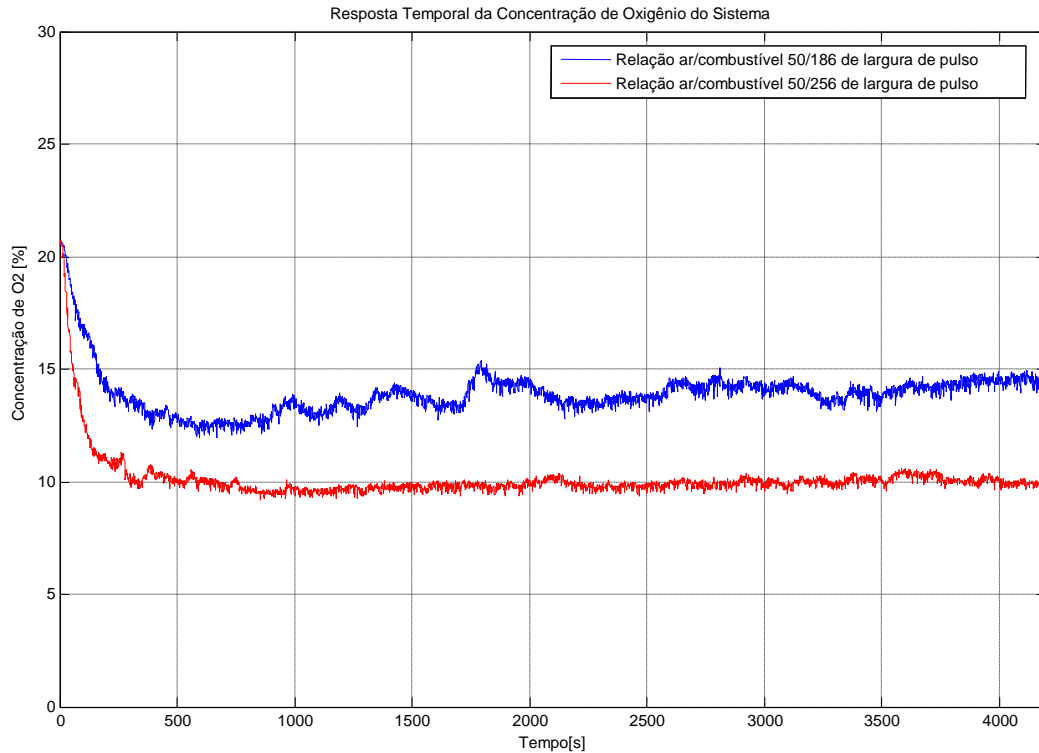


Figura 4.16: Resposta temporal da concentração de oxigênio para as relações ar/combustível selecionadas do sistema levantadas experimentalmente.

Uma função de transferência de primeira ordem foi aproximada através da média das respostas de concentração de oxigênio das duas situações já estabelecidas.

Na Figura 4.17 pode-se observar as respostas medidas do forno e a resposta do modelo teórico da concentração de oxigênio aproximado por uma função de transferência de primeiro grau devidamente ajustada, dada por:

$$T(s) = \frac{0.281}{89s + 1} \quad (4.7)$$



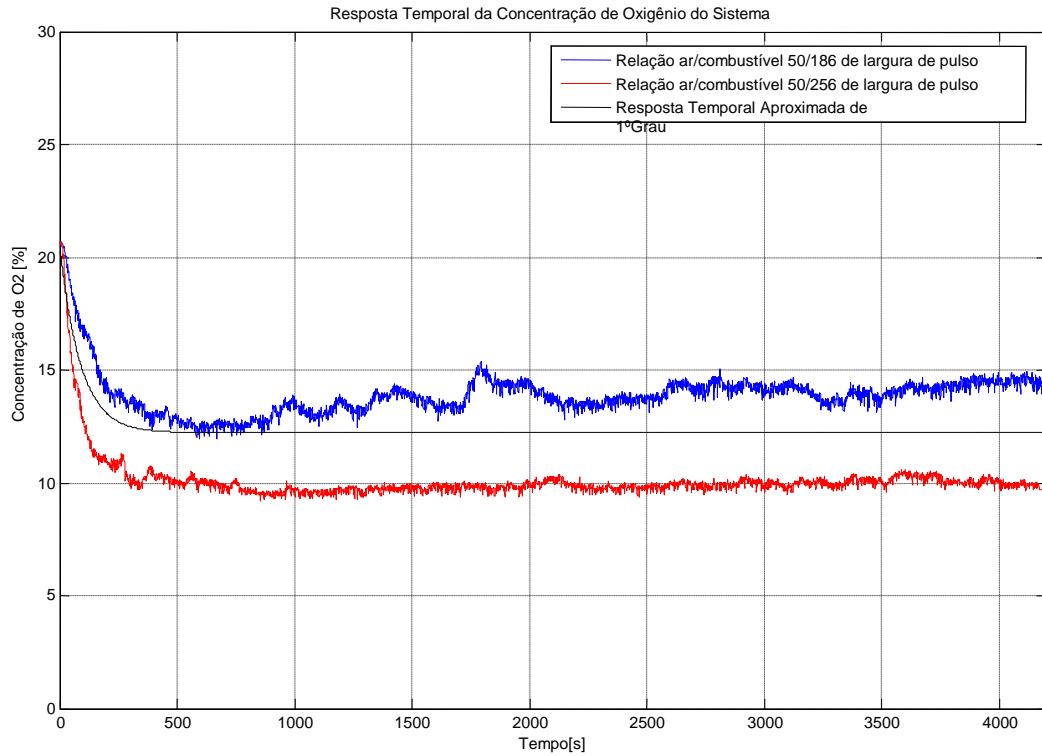


Figura 4.17: Comparativo entre as respostas medidas experimentalmente e a resposta gerada pela aproximação do modelo teórico.

Estas duas funções de transferência aliadas às curvas obtidas para os sensores foram integradas em um modelo teórico visando a simulação do comportamento do sistema no auxílio ao desenvolvimento de uma estratégia de controle, o que será apresentado no Capítulo 5.

## 5. PROJETO DE CONTROLADORES PI PARA TEMPERATURA E OXIGÊNIO

Os controladores são sistemas utilizados para, a partir dos sinais medidos, fazer com que as saídas de interesse do sistema físico convirjam para os valores de referência à medida que o tempo avança.

Este capítulo trata do controle em malha fechada utilizado (PI – Proporcional Integral), aborda o problema da sintonia dos ganhos dos controladores implementados e de sua validação e, finalmente, apresenta o sistema completo, com a interconexão dos controladores de temperatura e de emissões.

### 5.1 As Ações dos Controladores Adotados

Já foi visto, no capítulo anterior, que o processo a ser controlado apresenta comportamento exponencial, típico de sistemas de primeira ordem, tanto para a dinâmica da temperatura quanto da concentração de oxigênio. Segundo Coughanowr (1991), sistemas de baixa ordem nos quais se deseja um controle com baixo erro de regime podem ser adequadamente controlados por ações de controle proporcional e integral (controle PI). Assim, neste trabalho, optou-se pela implementação de controles desta natureza. O esquema implementado está apresentado na Figura 5.1.

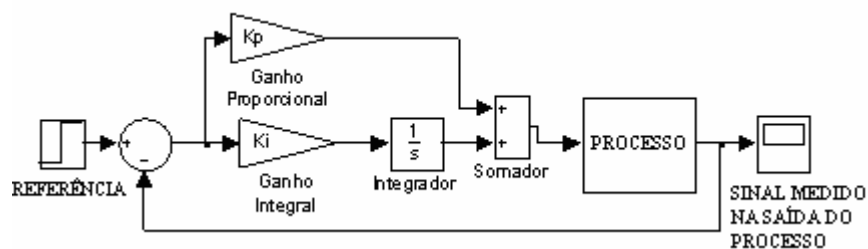


Figura 5.1: Exemplo esquemático do controlador proporcional integral utilizado.

Neste esquema, observa-se que o desvio, que é a diferença do sinal de referência em relação ao sinal medido na saída do sistema, é multiplicado por uma constante  $K_p$ , (ganho proporcional) resultando na ação de controle proporcional. O seu uso isolado não acrescenta pólos ou zeros na malha fechada do sistema. Apenas a localização dos pólos é alterada.

A parcela integral consiste de um termo resultante do produto da integral do sinal de desvio por uma constante  $K_i$  (ganho integral). Como a ação integral acrescenta ao sinal de controle um termo que aumenta enquanto o sinal de erro for não nulo, sua ação tende a eliminar

o erro de regime do sistema com o passar do tempo. A ação integral adiciona ao sistema um pólo e um zero em malha fechada.

O controle PI (proporcional integral) consiste em um sinal resultante da soma algébrica destas duas ações.

## 5.2 Ajuste dos Ganhos dos Controladores

Para ajustar adequadamente os ganhos das ações proporcionais e integrais dos controlares individualmente foi utilizada uma ferramenta computacional denominada de *Simulink Response Optimization* (Otimização de Respostas do *Simulink*) do software *Matlab*. Esta ferramenta proporciona ao usuário a possibilidade de operar com uma interface gráfica que, através de limites e restrições devidamente inseridos, ajusta automaticamente os ganhos dos controladores, de acordo com o desempenho necessário do sistema a partir de sua resposta no tempo. Assim, os valores limites, (também chamados de limites de saturação), são aplicados para que determinadas variáveis de controle não excedam os valores físicos reais ou para que não excedam determinados valores operacionais do sistema de controle.

Os ganhos encontrados com a ferramenta de otimização para o sistema de controle de temperatura através de simulações utilizando o modelo desenvolvido (vide Figura 5.2) foram:  $K_p$  (ganho proporcional) = 13,4473 e  $K_i$  (ganho integral) =  $7,652 \times 10^{-4}$ .

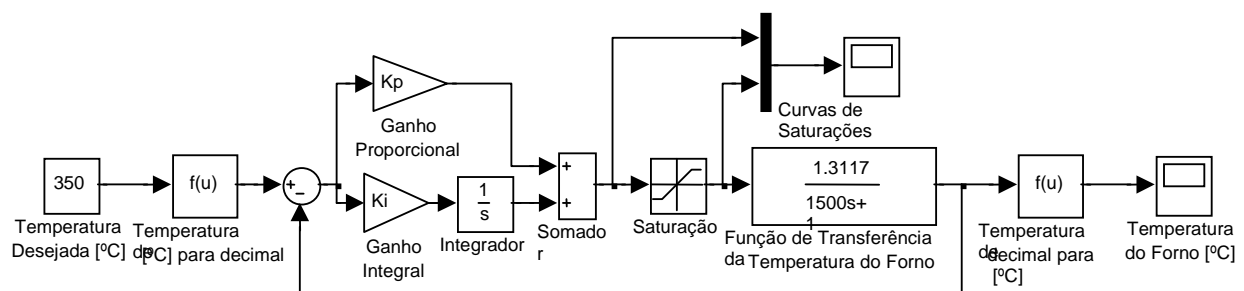


Figura 5.2: Diagrama de blocos do controlador de temperatura do sistema.

No modelo teórico desenvolvido para o controle de temperatura, o sinal de referência (Temperatura Desejada °C) é transformado para um valor em decimal. Esta transformação foi utilizada simplesmente para diminuir o tempo de processamento do microcontrolador, deixando assim as unidades no seu sistema de medida, evitando conversões desnecessárias em tempo real.

No esquema adotado, o desvio é calculado a partir da diferença entre a temperatura de referência e o sinal medido de temperatura na saída do sistema. Este desvio é multiplicado pelos

ganhos proporcional e integral e a soma destas duas ações resultantes corresponde à ação de controle proporcional-integral. O valor desta ação pode, em determinados momentos, superar os valores máximos e mínimos da faixa operacional do sistema. Para solucionar este problema, o limite de saturação determina que o valor da ação de controle seja mantido sempre entre 150 e 330 de largura de pulso que, neste caso, correspondem aos valores máximo e mínimo de vazão de gás da faixa operacional do forno (vide exemplo na Figura 5.3). Proporcionalmente à vazão de gás (que é queimado) ocorre a transferência ao processo de potência calorífica, que altera a temperatura de saída medida que é realimentada para um novo cálculo de desvio, caracterizando o controle realimentado.

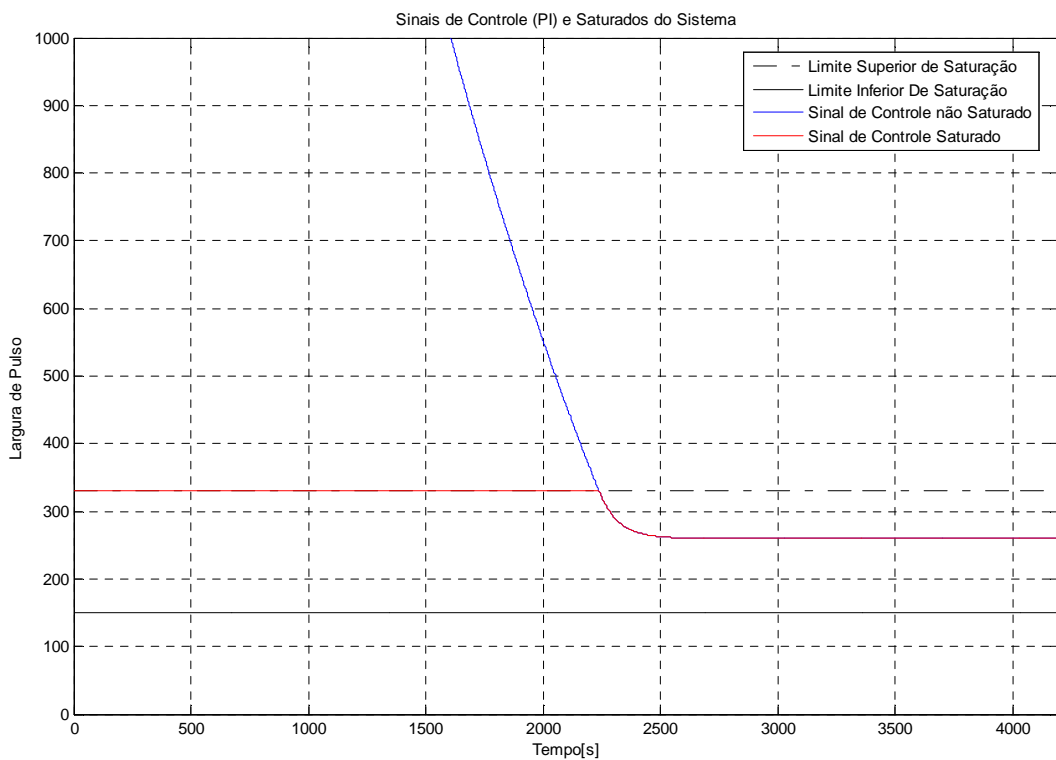


Figura 5.3: Curvas do sinal de controle e do sinal saturado para o caso do controle de temperatura do sistema.

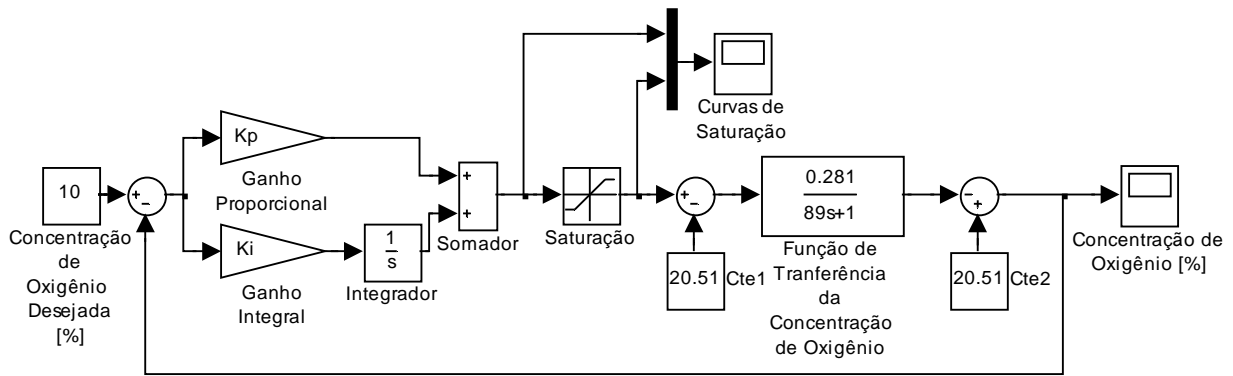


Figura 5.4: Diagrama em blocos do controlador de concentração de oxigênio do sistema.

Os ganhos encontrados para o ajuste do sistema de controle da concentração de oxigênio (vide Figura 5.4) foram:  $K_p$  (ganho proporcional) = -203,9 e  $K_i$  (ganho integral) = -0,473.

No caso do modelo teórico desenvolvido para o controle de concentração de oxigênio o desvio é calculado diretamente a partir da diferença entre o valor desejado % e o sinal medido na saída do sistema %. Este desvio é multiplicado pelos ganhos proporcional e integral e, a soma destas duas ações corresponde à ação de controle proporcional-integral. O valor desta ação pode também, em determinados momentos, superar os valores máximos e mínimos da faixa operacional do sistema. Para solucionar este problema, o limite de saturação, determina que o valor da ação de controle seja mantido sempre entre 40 e 90 de largura de pulso que, neste caso correspondem aos valores máximo e mínimo de vazão de ar da faixa operacional do forno (vide exemplo na Figura 5.5). Com a vazão aplicada ao processo tem-se novamente sinal medido de concentração de oxigênio na saída do sistema %.

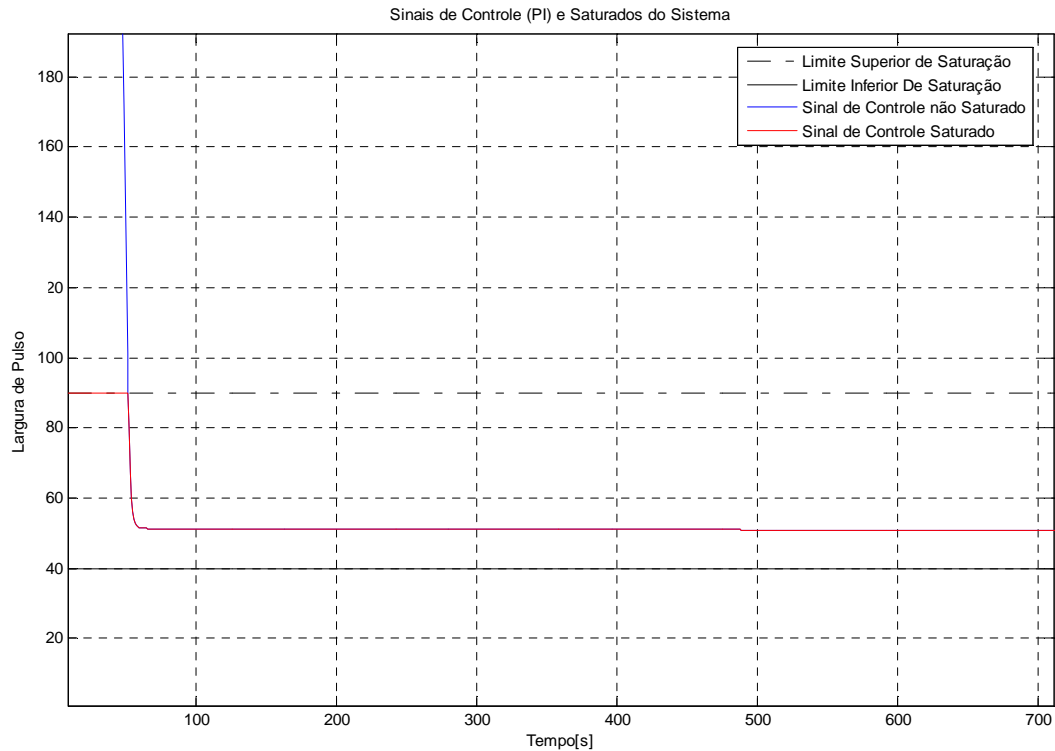


Figura 5.5: Comparativo entre o sinal de controle e o sinal saturado para o controle de concentração de oxigênio do sistema.

Os valores utilizados nas constantes  $Cte1$  e  $Cte2$  são valores aproximados da concentração de oxigênio na atmosfera. Juntamente com a função de transferência elas são responsáveis por adequar a resposta no tempo para o seu formato característico, que é apresentar como valor medido de concentração de oxigênio no ar atmosférico 21,2 % e, ao iniciar a combustão este valor deve decrescer para seu valor em regime.

### 5.3 Validação dos Ajustes dos Ganhos

Para validar os ajustes dos ganhos estabelecidos foram aplicadas ao sistema controlado diferentes entradas de referência de temperaturas e de concentrações de oxigênio de modo a verificar a convergência do sinal de saída para o valor desejado.

Pode-se observar através das figuras 5.6 e 5.7, respectivamente, que os resultados foram satisfatórios, já que os valores de saída convergiram para os respectivos valores de referência aplicados às entradas de temperaturas e de concentrações de oxigênio.

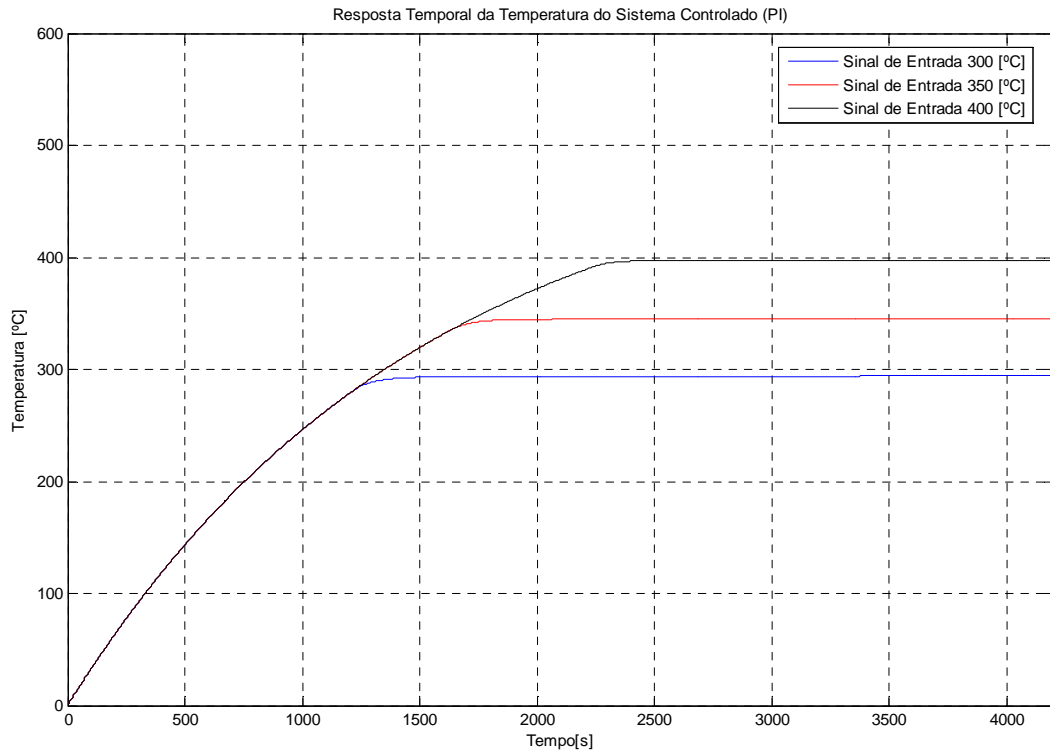


Figura 5.6: Validação dos ajustes dos ganhos do controlador de temperatura do sistema.

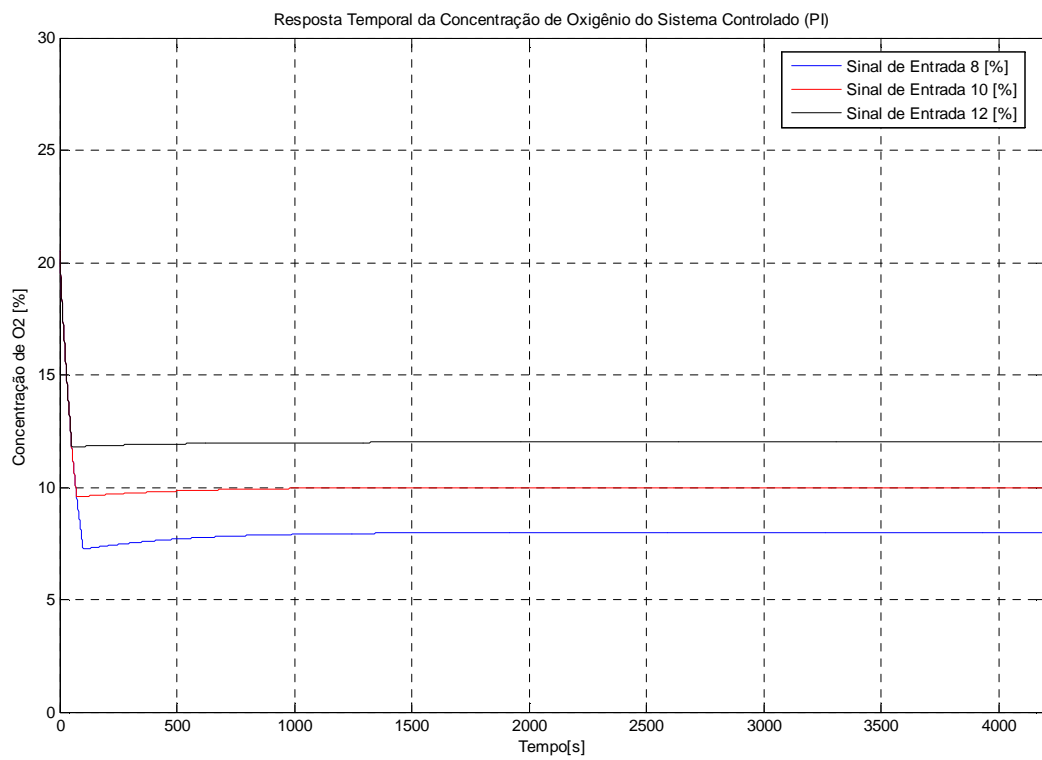


Figura 5.7: Validação dos ajustes dos ganhos do controlador de concentração de oxigênio.

## 5.4 O Controlador Completo

O diagrama de blocos controlador completo pode ser visualizado na Figura 5.8:

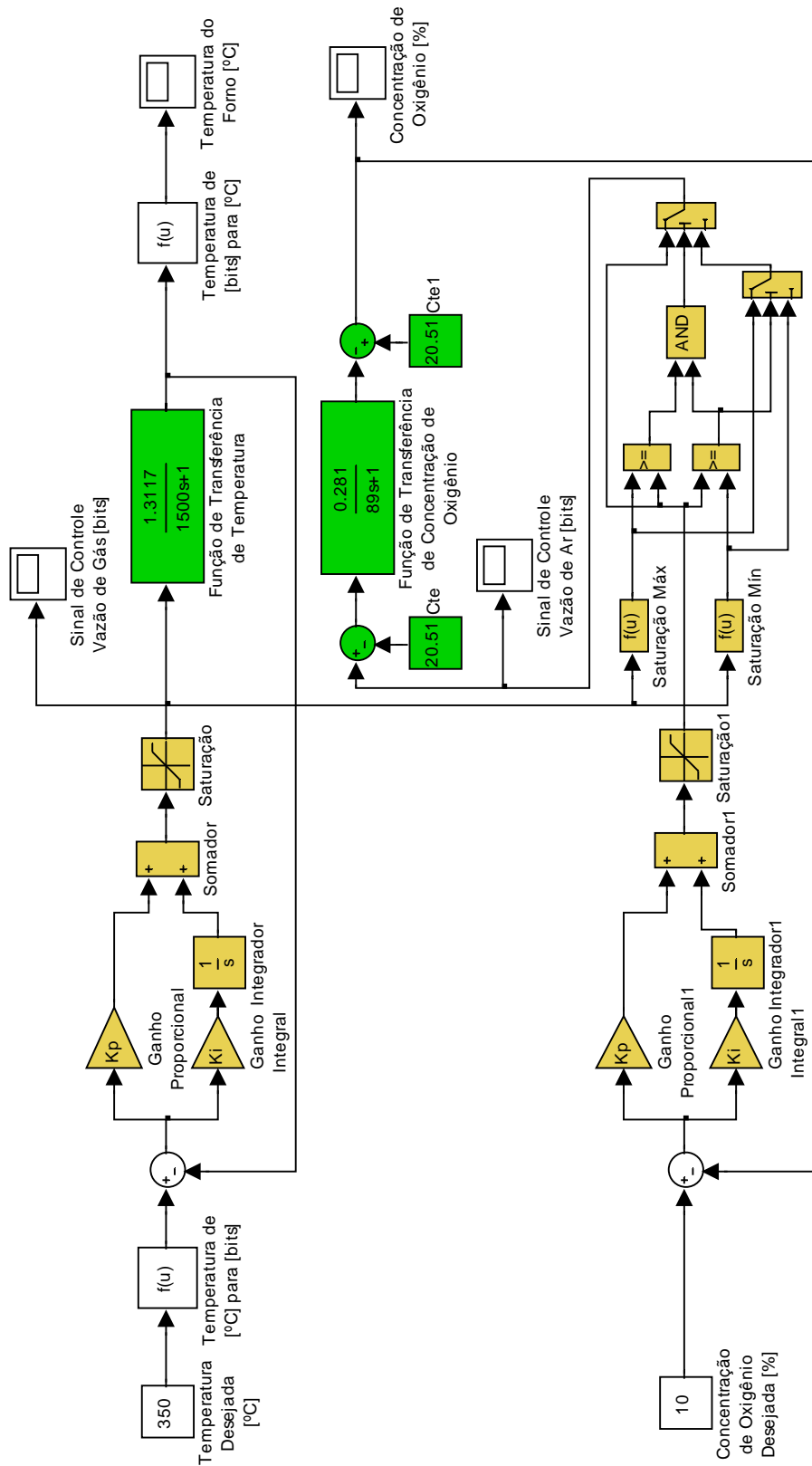


Figura 5.8: Diagrama de blocos do controlador completo do sistema.



O sistema de controle acoplado funciona da seguinte maneira: quando é desejada uma certa temperatura de referência, o controlador de temperatura busca uma vazão de gás capaz de atender a este valor. A partir desta vazão, duas funções delimitam os valores máximo e mínimo de vazão de ar de modo a permitir o correto funcionamento do forno, ou seja, estas funções têm o objetivo de manter a mistura ar/combustível dentro da faixa operacional do forno. Paralelamente, o controlador de concentração de oxigênio opera no sentido de fazer com que a vazão de ar aumente ou diminua adequadamente, de forma a levar a relação ar/combustível (concentração de oxigênio na saída do processo) a convergir para o valor desejado. Caso este controlador busque aplicar uma vazão de ar fora dos limites descritos anteriormente, este valor será automaticamente ajustado para o valor (máximo ou mínimo) mais próximo. Desta forma, o sistema de controle funciona, na prática, como dois laços de controle, o de temperatura é interno, com o controle de vazão de gás, e o externo, de concentração de oxigênio, com o controle atuando sobre a turbina de suprimento de ar, ambos saturando nos limites operacionais do sistema.

### **5.5 Resultados das Simulações do Controlador**

Nas figuras 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 têm-se, respectivamente, as respostas obtidas por simulação da temperatura e da concentração de oxigênio, além dos sinais de controle dos controladores de temperatura e de concentração de oxigênio do sistema acoplado.

Como o controle de temperatura é o laço interno, logo, pode-se observar através das figuras 5.3, 5.6, 5.9 e 5.11 que nenhuma alteração ocorreu, ou seja, a resposta e o sinal da ação do controlador são os mesmos do sistema de controle individual.

No laço externo, onde é realizado o controle de concentração de oxigênio, pode-se observar diferenças significativas. Durante o aquecimento do forno, ou seja, do início do processo (temperatura ambiente) até próximo de atingir o valor de temperatura desejado, o sistema de controle de oxigênio não é capaz de atender ao valor de concentração de oxigênio desejado (satura). Durante esta etapa de aquecimento, o sinal de controle de concentração de oxigênio encontra-se saturado. Próximo da estabilização da temperatura, o sinal de controle sai da faixa de saturação, atuando assim sobre o sistema, fazendo com o valor de saída convirja para o valor de concentração de oxigênio desejado (figuras 5.10 e 5.12).

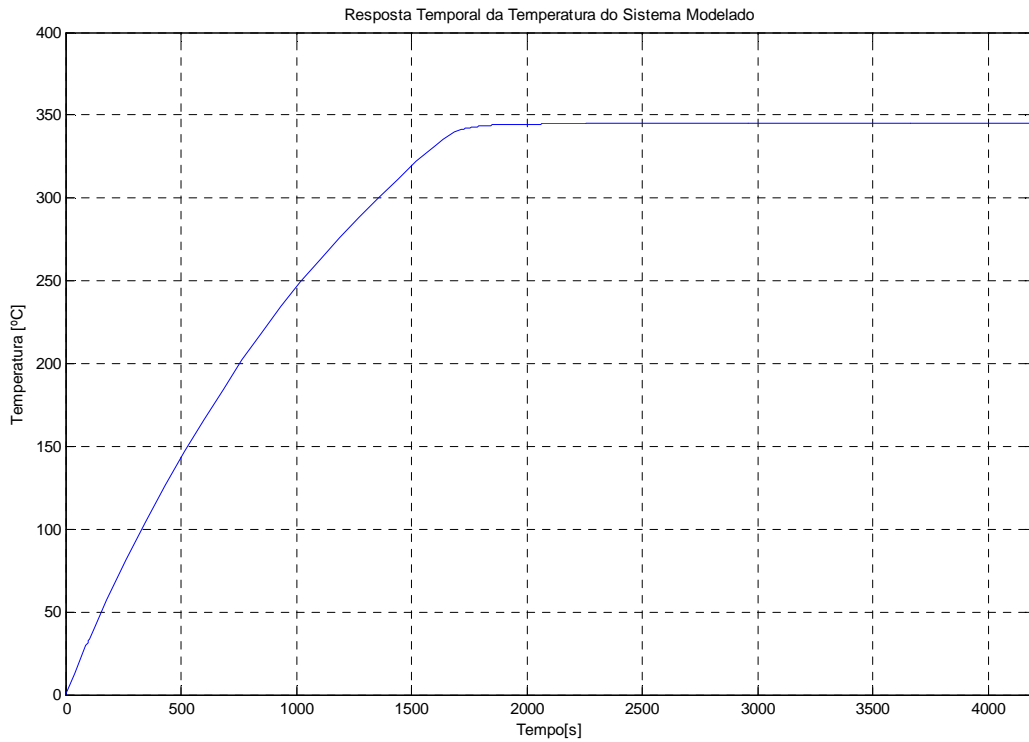


Figura 5.9: Resposta da simulação do comportamento da temperatura para o sistema de controle completo para uma temperatura de referência desejada de 350 °C.

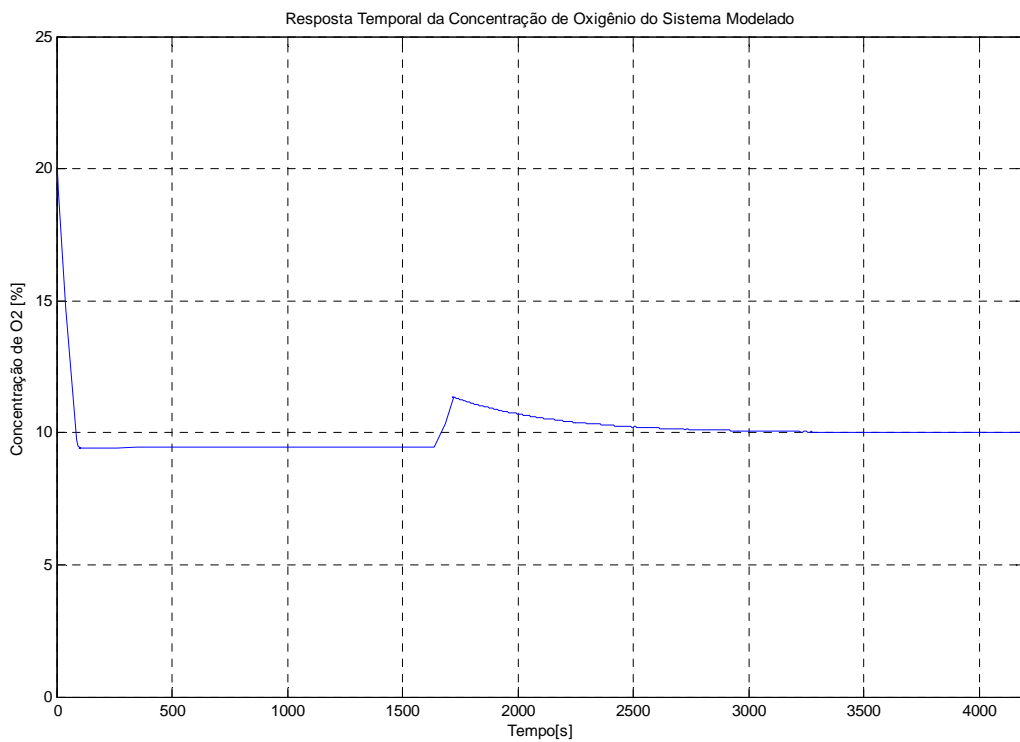


Figura 5.10: Resposta no tempo simulada da concentração de oxigênio para o sistema de controle completo para uma entrada de referência desejada de 10 %.

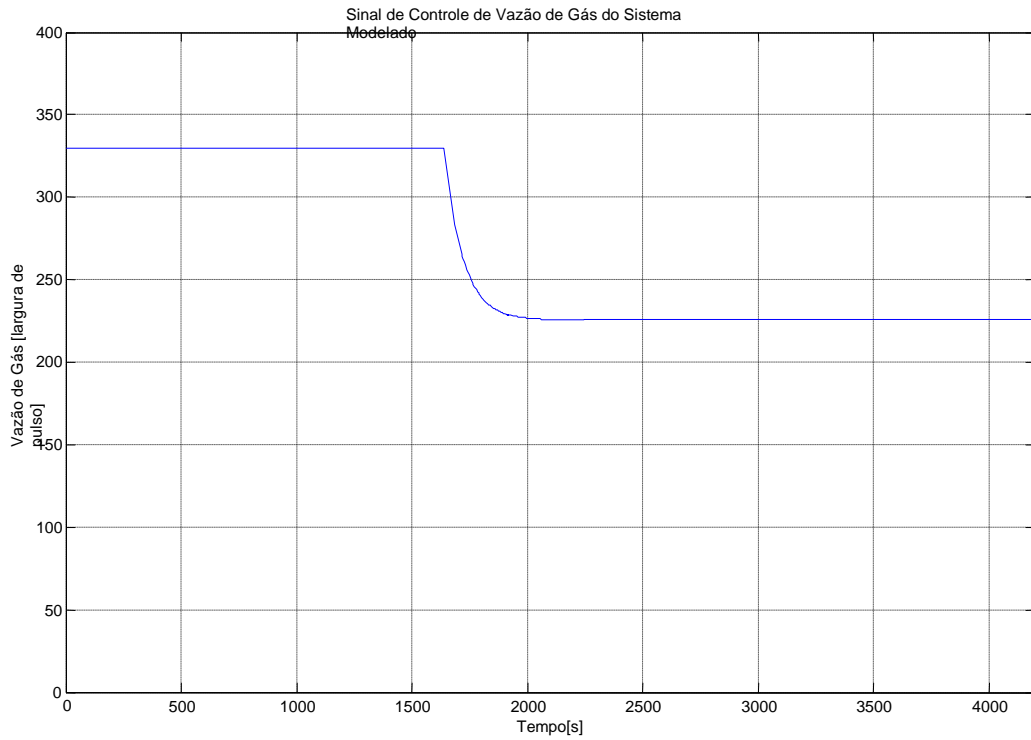


Figura 5.11: Sinal de controle da vazão de gás utilizada para a atuação sobre a temperatura de saída do sistema (simulação).

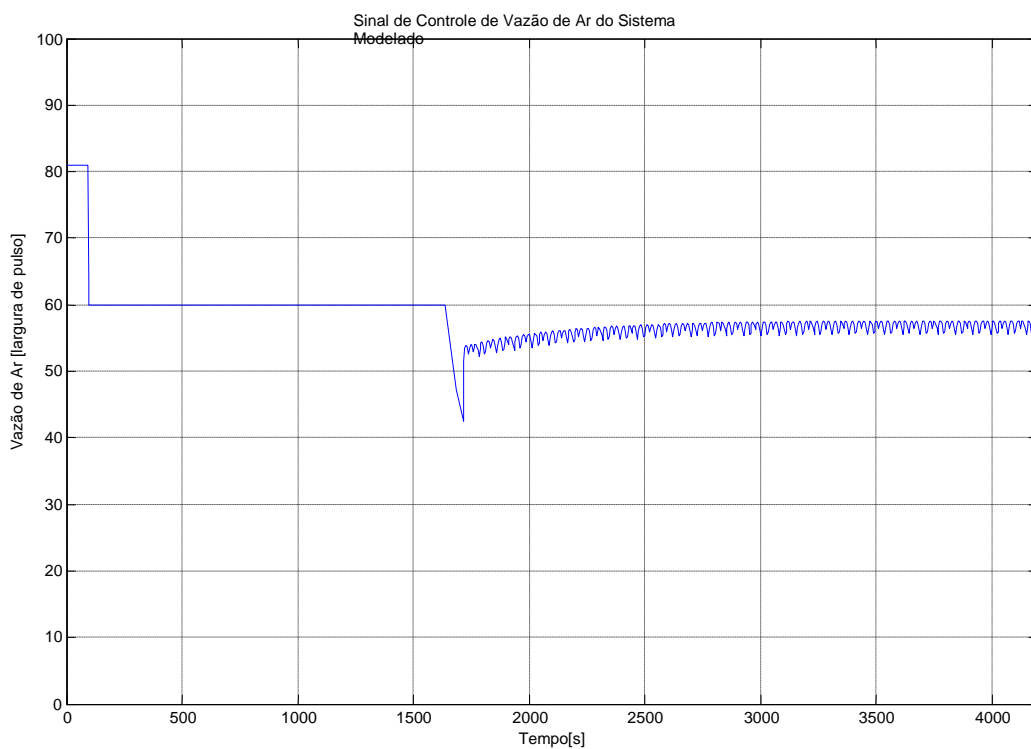


Figura 5.12: Sinal de controle da vazão de ar utilizada para a atuação sobre a concentração de oxigênio na saída do sistema (simulação).

## 6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais do controlador *on-off* tradicional, os resultados experimentais do controlador completo implementado através do microcontrolador e os resultados experimentais de emissões medidos com o analisador de gases, assim como a discussão dos mesmos.

### 6.1 Resultados Experimentais do Controlador *On-Off*

Para os testes experimentais do sistema de controle *on-off* (liga-desliga) implementado com o microcontrolador foram aplicadas em suas entradas uma temperatura de referência de 350 °C com uma janela de 6 °C, ou seja, desliga quando atingir temperaturas superiores a 353 °C e liga para temperaturas inferiores a 347 °C. A vazão de gás utilizada foi de 0,0978 m<sup>3</sup>/h e de vazão de ar de 4,7299 m<sup>3</sup>/h.

Pode-se observar as medições de emissões de gases realizadas no sistema de controle liga-desliga através das figuras 6.1 e 6.2.

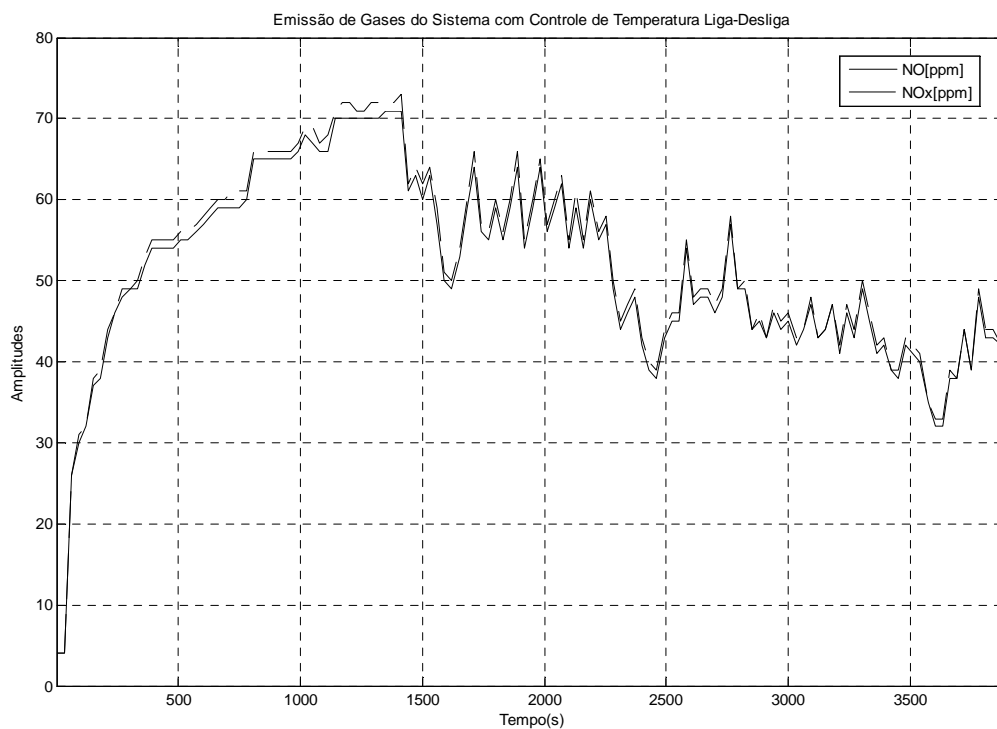


Figura 6.1: Concentrações de NO e NOx medidas com o analisador de gases durante o teste de sistema de controle liga-desliga tradicional.

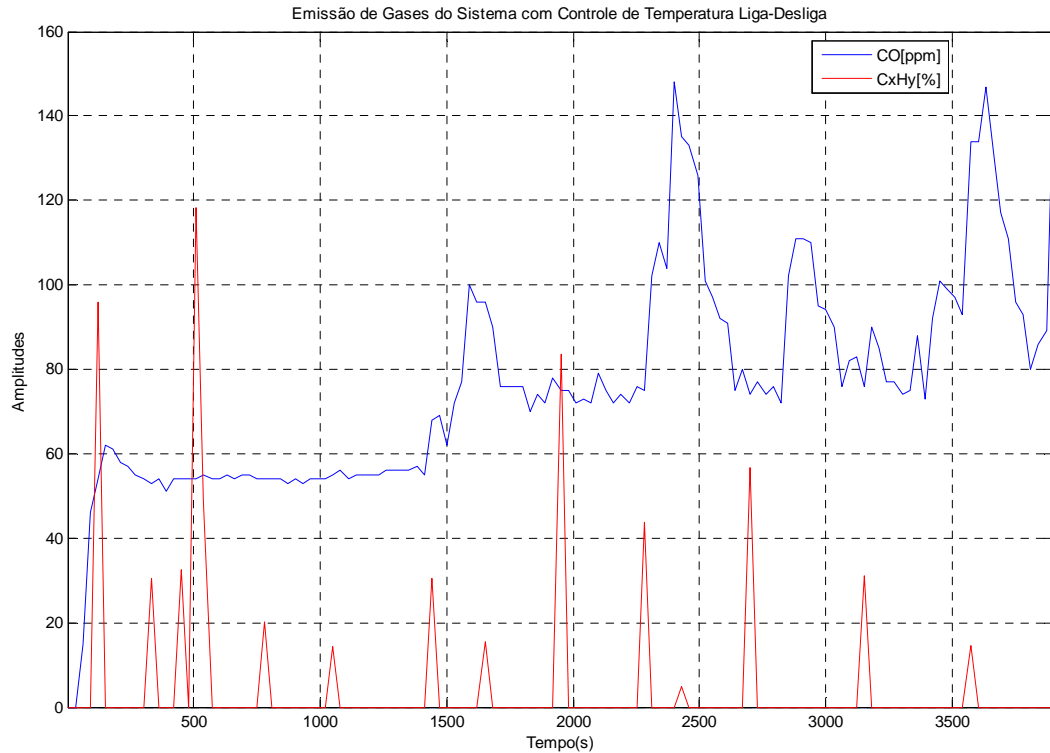


Figura 6.2: Concentrações de CO e HC medidas com o analisador de gases durante o teste de sistema de controle liga-desliga tradicional.

## 6.2 Resultados Experimentais do Controlador

O esquema de controle apresentado para simulação (Figura 5.8) foi adaptado e implementado experimentalmente através do sistema descrito no Capítulo 3. Para os testes experimentais do sistema completo foi aplicado em suas entradas uma temperatura de referência de 350 °C e uma concentração de oxigênio desejada de 10 %.

Nas figuras 6.3, 6.4, 6.5 e 6.4 têm-se, respectivamente, as respostas experimentais de temperatura e de concentração de oxigênio, o sinal de controle do laço de temperatura e o sinal de controle do laço de concentração de oxigênio.

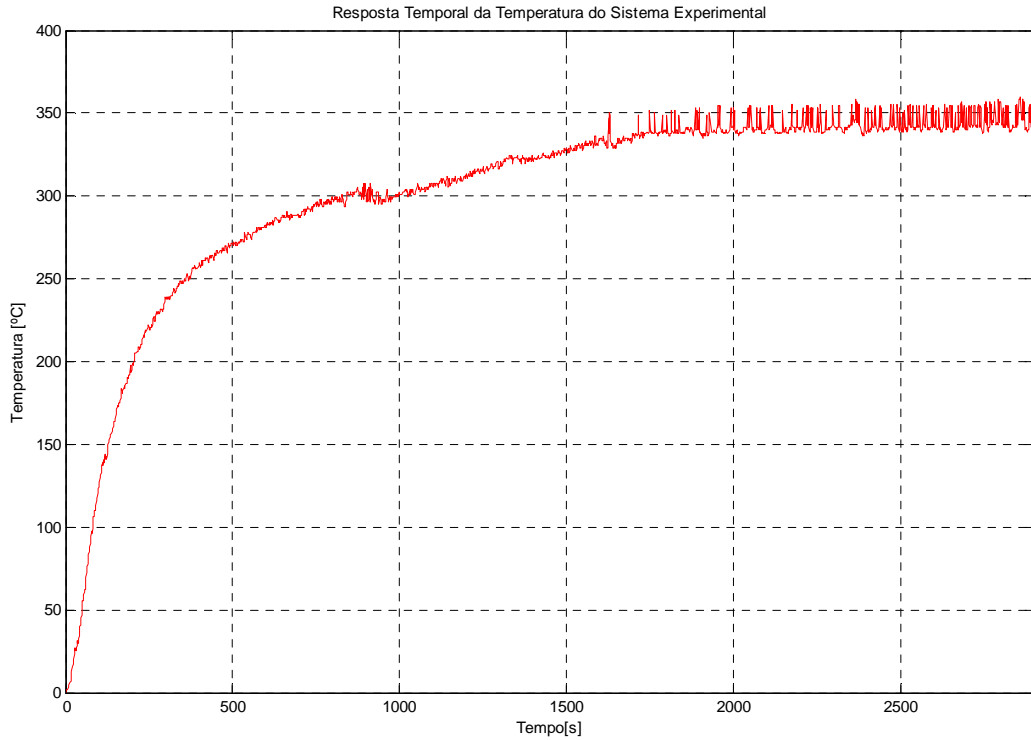


Figura 6.3: Resposta no tempo da temperatura para o sistema de controle completo experimental (para uma temperatura desejada de 350 °C).

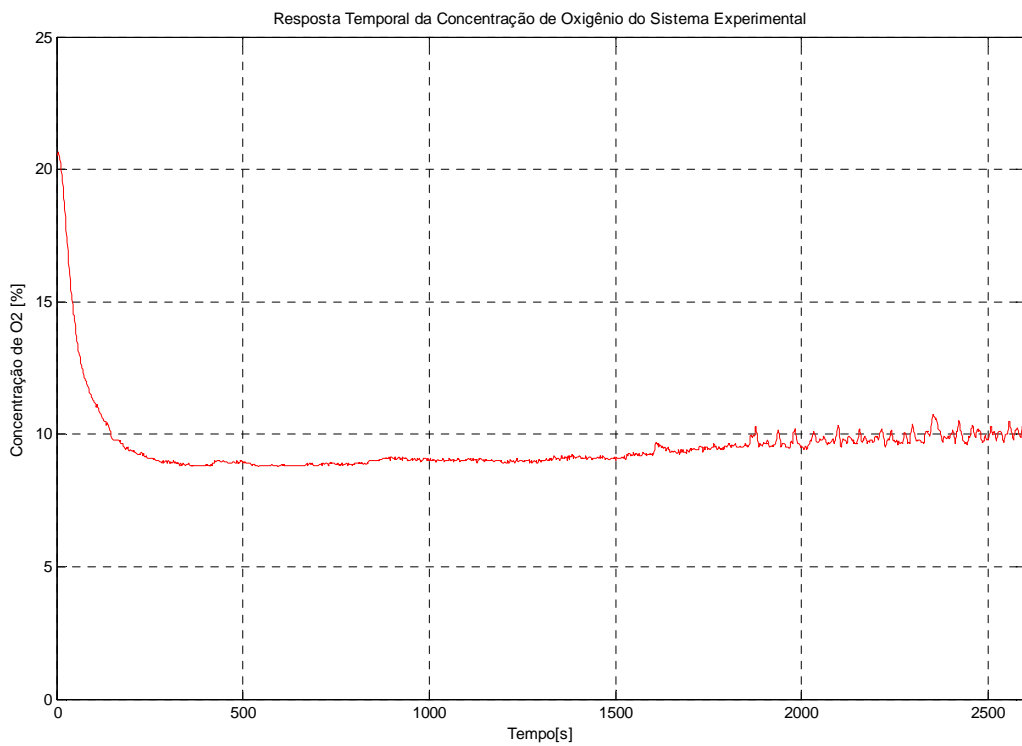


Figura 6.4: Resposta no tempo da concentração de oxigênio para o sistema de controle completo experimental (para uma entrada desejada de 10 %).

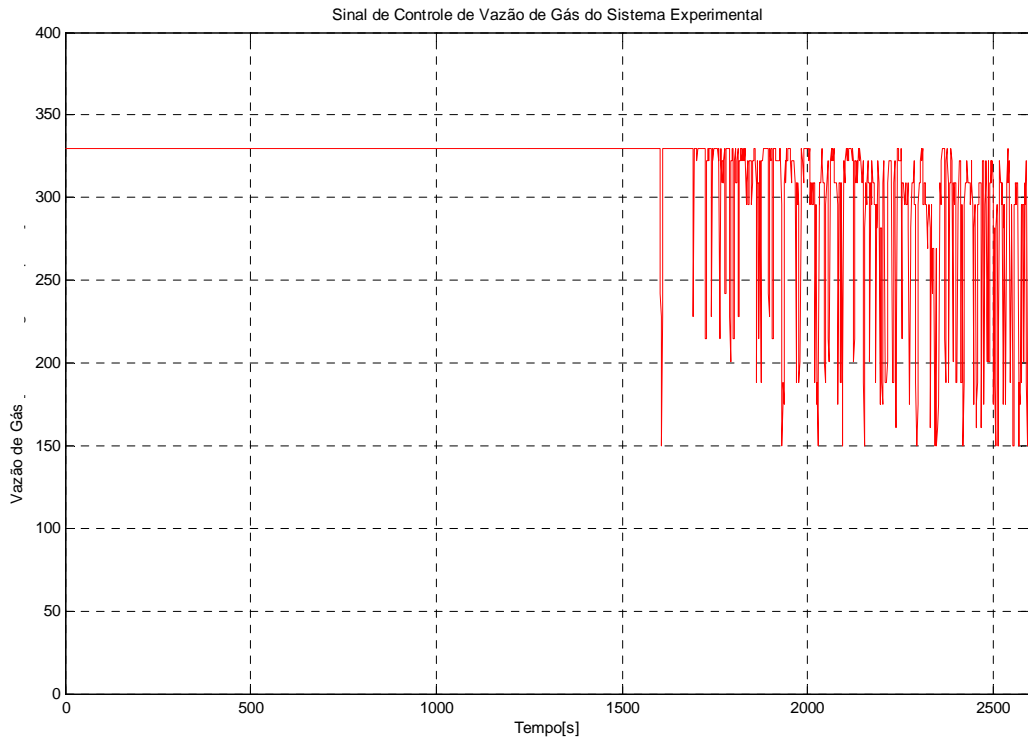


Figura 6.5: Sinal de controle utilizado para o controle da vazão de gás que regula a temperatura do forno.

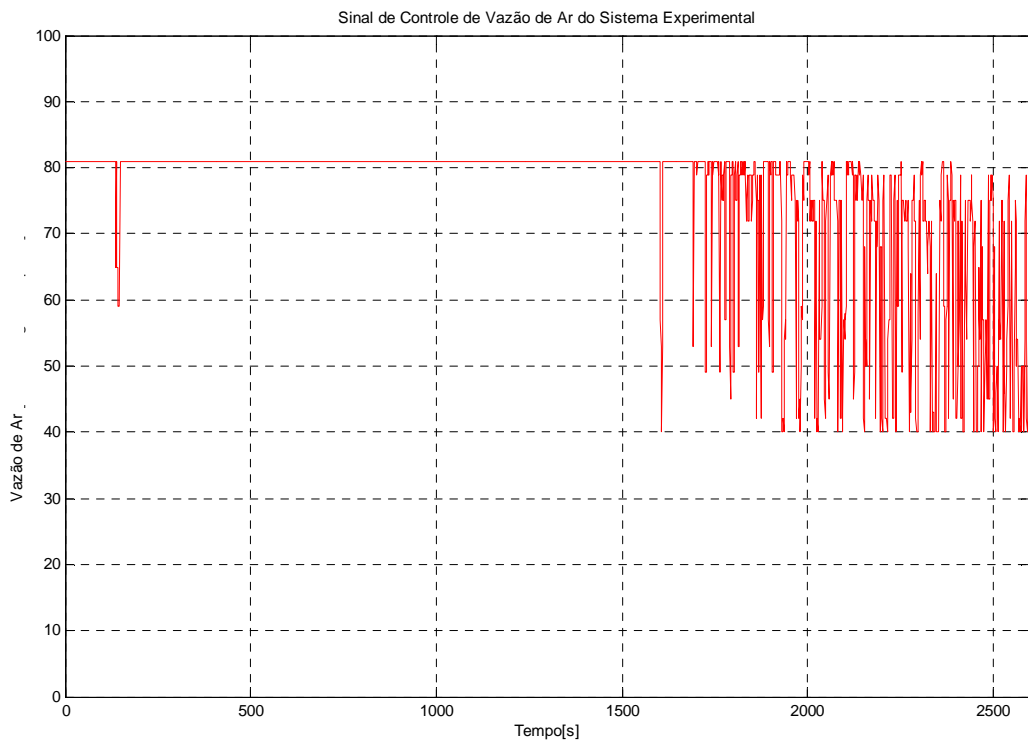


Figura 6.6: Sinal de controle da vazão de ar que regula a concentração de oxigênio do sistema experimental.

A validação de controle da temperatura é verificada através da convergência da temperatura para o valor de referência desejado. Ela pode ser comprovada através do comparativo entre as figuras 5.9 e 6.3. Os picos apresentados na curva da resposta experimental ocorrem devido à localização do termopar, que está próximo ao queimador. Ao modular, a chama aumenta rapidamente de comprimento, ocasionando assim o ruído em questão. A adição de um ou mais termopares deve poder resolver este problema, pois irá fazer a leitura da temperatura através de uma média.

A validação do controle da concentração de oxigênio pode ser comprovada através da comparação entre as figuras 5.10, 6.4 e 6.7 (contida nos resultados experimentais de emissões, seção 6.2).

O início da atuação das ações de controle modeladas coincidiu com o início das ações experimentais em ambos os controladores. Isto pode ser observado através da comparação da figura 5.11 com a 6.5 e da figura 5.12 com a 6.6.

### **6.3 Resultados Experimentais de Emissões**

Nos testes experimentais do sistema completo implementado com o microcontrolador, também foram medidas com o analisador de gases as concentrações para a validação do controle implementado.

Nas figuras 6.7, 6.8 e 6.9 têm-se, respectivamente, as concentrações dos seguintes gases: O<sub>2</sub>, NO com NO<sub>x</sub> e CO com HC.



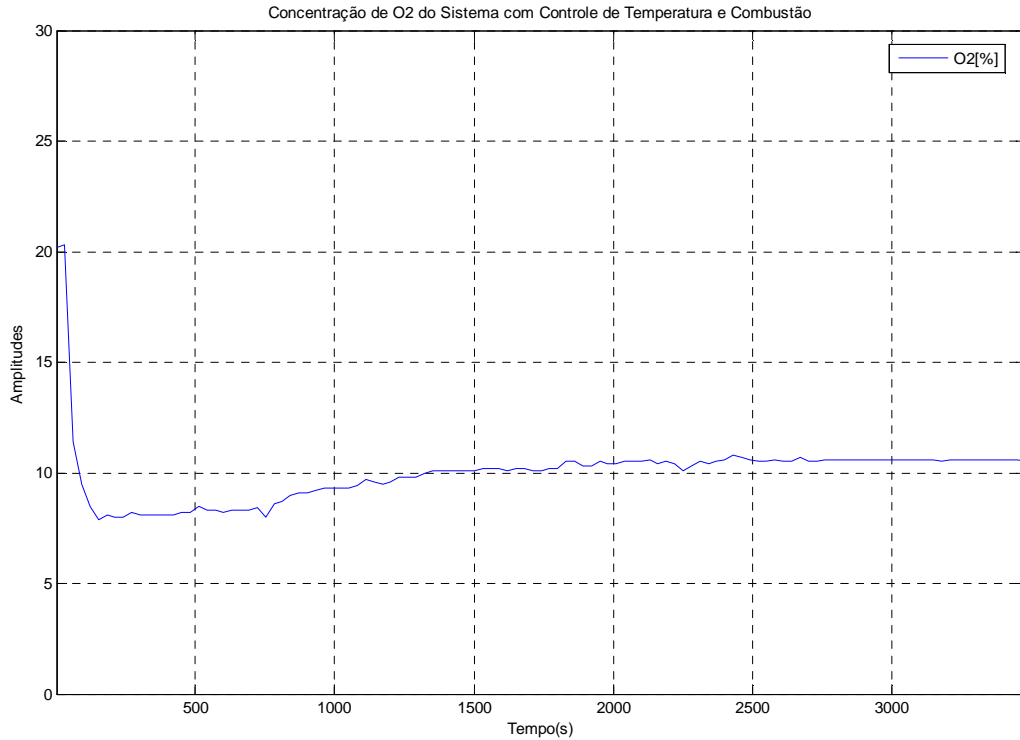


Figura 6.7: Concentração de oxigênio medida com o analisador de gases durante o teste de controle do sistema experimental.

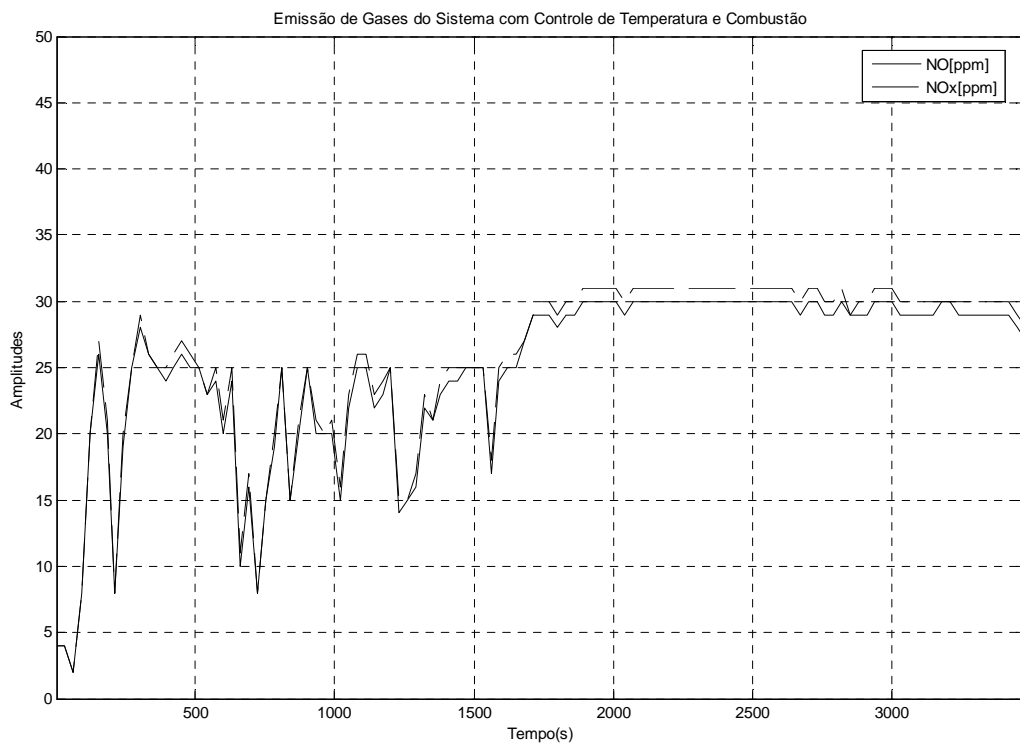


Figura 6.8: Concentrações de NO e NO<sub>x</sub> medidas com o analisador de gases durante o teste de controle do sistema experimental.

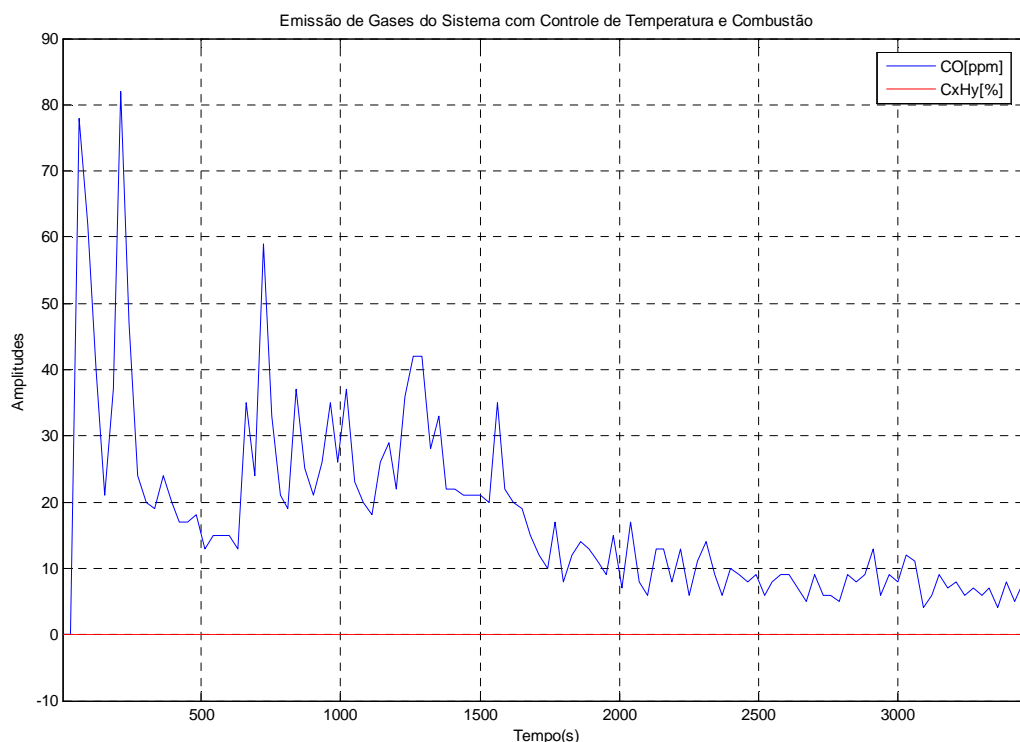


Figura 6.9: Concentrações de CO e HC medidas com o analisador de gases durante o teste de controle do sistema experimental.

A medição realizada pelo analisador de gases comprova que, de uma forma geral, o controle propiciou uma diminuição de emissões dos gases nocivos da combustão. Isto pode ser verificado através da comparação das figuras 6.1 e 6.2 de emissões do controle liga-desliga com as figuras 6.8 e 6.9 do controle em malha fechada desenvolvido. Também se pode observar que os picos de NO e NO<sub>x</sub> foram praticamente eliminados. Observa-se, além disso, que, ao contrário do que ocorre no controle liga-desliga, onde o nível de CO cresce ao longo do tempo, no sistema de controle em malha fechada, o nível de CO reduz-se para valores que podem ser considerados desprezíveis. Como, no controle em malha fechada desenvolvido, a chama não se extingue em nenhuma situação, ou seja, não é necessário acender e apagar a chama ao longo do processo para o controle da temperatura, não existe emissão significativa de hidrocarbonetos (HC) para a atmosfera. Isto não é verdade para o controle liga-desliga, onde para cada reinício de processo de combustão ocorre um pico de emissão.

Conclui-se também, que ocorre uma redução de emissão de gases nocivos (CO, NO e NO<sub>x</sub>) devida a uma melhor uniformidade da combustão através do controle da mistura ar/combustível.

## 7. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizada uma revisão bibliográfica que abrange a fundamentação teórica básica da combustão, os principais poluentes atmosféricos e as principais técnicas de controle de temperatura e combustão que estão sendo desenvolvidas por pesquisadores sobre o tema e controle de temperatura e combustão. Estas tecnologias poderão contribuir com a metodologia aplicada neste trabalho, a fim de obterem-se resultados ainda mais efetivos.

O valor da razão estequiométrica para o sistema do forno é de 15,55, ou seja, uma parte de gás para cada 15,55 partes de ar. Em função desta razão estequiométrica, pôde-se determinar através do relacionamento das diferentes combinações de vazões mássicas possíveis para o correto funcionamento do forno (seção 4.3) que, o fator  $\lambda$  encontra-se na faixa de 1,3959 e 3,7402, ou seja, uma mistura ar/combustível pobre e afastada da razão estequiométrica, evitando assim, as altas emissões de CO.

Para o combustível utilizado calculou-se um poder calorífico superior aproximado de 11913 Kcal/kg e inferior de 10985 Kcal/kg, resultando então em uma temperatura de chama no ar de aproximadamente 1970 °C. Para a temperatura ambiente de 25 °C e à pressão atmosférica, os valores limites de inflamabilidade calculados a partir das vazões de ar e gás aplicadas ao sistema foram de: limite inferior de inflamabilidade = 1,31 % e limite superior de inflamabilidade = 2,477 %. É importante ressaltar que a energia liberada pela reação de queima é máxima na composição estequiométrica e mínima nas concentrações próximas aos limites de inflamabilidade, sendo assim, buscou-se sempre operar numa região intermediária compreendida por estes fatores, de acordo com a determinação da faixa operacional e mapeamento das características do forno realizados.

Obteve-se sucesso na implementação experimental do sistema de controle do forno, sendo que grande parte dos componentes e dos equipamentos utilizados para o processo de combustão e para o sensoriamento do sistema foram desenvolvidos no âmbito do presente trabalho, assim como, os sistemas de interfaceamento dos sensores com o microcontrolador, condicionamento de sinais e o interfaceamento do microcontrolador com um microcomputador.

Os testes realizados com um analisador de gases através do monitoramento das emissões foram essenciais para a identificação dos parâmetros e modelagem do sistema. Os sensores foram devidamente aferidos e calibrados destes testes também.

A modelagem realizada através da aproximação dos processos em sistemas de primeira ordem, assim como, seus equacionamentos individuais foram devidamente validados.

Os controladores PI projetados para temperatura e combustão, os quais foram ajustados individualmente através de simulações, foram validados também. Estes foram interconectados através de funções de saturação responsáveis em manter o correto funcionamento do forno. Seus resultados de simulações, assim como, os ajustes dos ganhos  $K_p$  e  $K_i$  de cada controlador, também foram devidamente validados. Os modelos de controladores foram adaptados e implementados experimentalmente através do sistema descrito no Capítulo 3. Por fim foram realizados os testes para determinação da eficiência do controle de temperatura e combustão. A validação do controle da temperatura foi realizada através da verificação da convergência da temperatura para o valor de referência desejado. O controle desenvolvido propiciou também uma diminuição de emissões dos gases nocivos da combustão em comparação com o sistema tradicional de controle liga-desliga.

Apesar de excessos de ar de queima altos levarem a maiores emissões de  $\text{NO}_x$  (como relata a bibliografia), no sistema desenvolvido, o valor de emissão de  $\text{NO}_x$  ficou abaixo de 30 [ppm] e estável. Pôde-se observar também que os picos de  $\text{NO}$  e  $\text{NO}_x$  foram praticamente eliminados.

Ao contrário do que ocorre no controle liga-desliga, onde o nível de  $\text{CO}$  cresce ao longo do tempo, no sistema de controle em malha fechada, o nível de  $\text{CO}$  reduz-se para valores que podem ser considerados desprezíveis.

Conclui-se que o trabalho atingiu as metas propostas de desenvolver uma arquitetura de controle de temperatura e combustão.

## 7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Aprofundamento da modelagem do sistema;
- compromisso entre eficiência térmica e emissões;
- medição, sensoriamento e controle da concentração de mais gases;
- testes de campo em empresas que utilizam processos afins;
- implementação de outros controladores, sejam estes: lineares (PID e realimentação de estados, por exemplo) ou não-lineares (linearização por

realimentação de estados, controle estocástico preditivo e controle adaptativo, por exemplo);

- estruturação de um *kit* flexível para ser aplicado ao controle de outros sistemas (com outros tipos de atuadores, por exemplo);
- integração com outras técnicas de controle de combustão (imagem, som, etc.).

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atmel Corporation. Disponível em: <<http://www.atmel.com>>. Acesso em: 11 out. 2007.
- Bosch. Disponível em: <<http://www.bosch.com>>. Acesso em: 11 out. 2007.
- Coughanowr, R., 1991. **“Process Systems Analysis and Control”**, 2ª edição, McGraw-Hill.
- Eurotron. Disponível em: <<http://www.eurotron.com>>. Acesso em: 11 out. 2007.
- Festo Corporation. Disponível em: <<http://www.festo.com>>. Acesso em: 11 out. 2007.
- Fogarty, T.C. e Bull, L., 1995. **“Optimising individual control rules and multiple communicating rule-based control systems with parallel distributed genetic algorithms”**, IEEE.
- Garcia, Roberto, 2002. **“Combustíveis e Combustão Industrial”**, Editora Interciência, Rio de Janeiro.
- Guibet, J.; Faure-Birchem, E.; 1999. **“Fuels and Engines”**, Editions Technip, Paris.
- Heywood, J. B.; 1988. **“Internal Combustion Engine Fundamentals”**, McGraw-Hill.
- Intersil. Disponível em: <<http://www.intersil.com>>. Acesso em: 11 out. 2007.
- Lao. Disponível em: <<http://www.laosp.com.br>>. Acesso em: 11 out. 2007.
- Linpo Technology. Disponível em: <<http://www.linpo.com>>. Acesso em: 11 out. 2007.
- Minipa. Disponível em: <<http://www.minipa.com.br>>. Acesso em: 11 out. 2007.
- Miyamoto, Yuichi; Nishino, Kimiyoshi; Sawai, Tsuneyoshi; Nambu, Eichiro, 1996. **“Development of Ai-Vision for Fluidizedbed Incinerator”**, International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, IEEE.
- Motorcraft. Disponível em: <<http://www.motorcraft.com>>. Acesso em: 11 out. 2007.
- National Semiconductor Corporation. Disponível em: <<http://www.national.com>>. Acesso em: 11 out. 2007.
- Nokia. Disponível em: <<http://www.nokia.com>>. Acesso em: 11 out. 2007.
- Plint, M, A & Martyr, A., 1997. **“Engine Testing Theory and Practice”**, Butterworth-Heinemann.
- Prochnow, Marcos Alberto, 2003. **“Monitoramento de Gases – Estudo Comparativo das Principais Tecnologias de Sensores e aspectos relacionados”**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia.
- Qin, Yong; Jia, Li-Min e Zhang, Xi-Di, 1998. **“Automation of Combustion Process for Coke Oven Using Multivariable Fuzzy Control Technique”**, IEEE.
- Sbarbaro, D.; Zawads, A. e Farias, O., 2002. **“Monitoring and Characterization of Combustion Flames by Generalized Hebbian Learning”**, IEEE.

SGS – Thomson Microelectronics. Disponível em: <<http://www.st.com>>. Acesso em: 11 out. 2007.

Texas Instruments. Disponível em: <<http://www.ti.com>>. Acesso em: 11 out. 2007.

Wenjiang, Liu; Shuming, Zhang e Hongwei, Ye, 1993. **“Measurement and Control of Combustion Process of Industrial Furnaces”**, IEEE.

Wyllen, G.J. e Sonntag, R.E., 1993. **“Fundamentos da Termodinâmica Clássica”**, 3ª edição, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo.

Zeitronix. Disponível em: <<http://www.zeitronix.com>>. Acesso em: 11 out. 2007.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)



[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)