

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

CONTROLE SIMULTÂNEO DE TEMPERATURA E ESTEQUIOMETRIA APLICADO EM
UM SECADOR VERTICAL DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS ALIMENTADO COM
GÁS NATURAL

por

João Mota Neto

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, dezembro de 2008

CONTROLE SIMULTÂNEO DE TEMPERATURA E ESTEQUIOMETRIA APLICADO EM
UM SECADOR VERTICAL DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS ALIMENTADO COM
GÁS NATURAL

por

João Mota Neto

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. Ph.D. Jean Viane Leite

Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Prof. Dr. Pedro Barbosa Mello

Prof. Dr. Flavio José Lorini
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, dezembro de 2008.

RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um protótipo para o controle em malha fechada da temperatura e estequiometria de um secador vertical cerâmico alimentado a gás natural, instalado na linha de produção de revestimentos cerâmicos da empresa Eliane Revestimentos Cerâmicos – Unidade II, em Cocal do Sul - SC. É apresentada a fundamentação teórica da combustão e os dados experimentais do comportamento do protótipo aplicado no secador, com o objetivo de reduzir a emissão de poluentes e aumentar a eficiência de queima do gás natural, tendo como consequência a diminuição do consumo do mesmo. Foi aproveitada a estrutura do secador referente à instrumentação e aos mecanismos de combustão. Sendo concluído o sensoriamento, com a adição do sensor de oxigênio em um tubo fixado ao queimador. A interface de potência do protótipo foi realizada com a inclusão do inversor de frequência para o controle da rotação do ventilador de combustão. Com a conclusão da implementação da instrumentação, e interfaces de potência do protótipo, foi inserido o sistema de supervisão desenvolvido com a ferramenta *Delphi* no computador industrial do secador, o qual contém as telas referentes às monitorações dos sensores e parametrização do controlador. Com o estudo do comportamento do processo em questão, foi obtido o modelo matemático através da análise dos dados experimentais do secador. A partir deste, desenvolveu-se o projeto e a estratégia de controle, bem como, o algoritmo de controle. O modelo teórico do sistema de controle foi implementado em um microcontrolador. Realizaram-se simulações do modelo teórico de controle para validar o mesmo referente à estabilidade, tanto na temperatura, quando na estequiometria. Após a validação do controle pelas simulações realizadas, foi implementado no secador o protótipo. Ao longo de um período pré-determinado foi analisado o comportamento do secador com o protótipo, visando comparar com o sistema original os ganhos obtidos vinculados a etapa de secagem como: aumento da qualidade final das peças cerâmicas e redução do consumo de gás natural. Conclui-se, que o trabalho atingiu as metas propostas, pois a validação do controle desenvolvido foi comprovada através da verificação da estabilidade da temperatura e estequiometria, aumento da qualidade final das peças cerâmicas e redução dos níveis de emissão de poluentes comparados ao sistema original do secador.

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

ABSTRACT:

"SIMULTANEOUS CONTROL OF TEMPERATURE AND STOICHIOMETRIC APPLIED TO A VERTICAL DRYER CERAMIC FEEDED WITH NATURAL GAS"

This work describes the development of a prototype for the closed loop control of temperature and composition of a vertical ceramic dryer fueled with natural gas, installed on the production line of Coating Ceramics Tiles Eliane Company - Unit II in Cocal do Sul - SC. It presented the theoretical foundation of combustion and experimental data of the behavior of the prototype used in the dryer, with the objective of reducing the emission of pollutants and increase the efficiency of burning natural gas, and consequently the decrease in consumption of it. It used the structure of the hair on the instrumentation and the mechanisms of combustion. Since the sensing completed with the addition of the oxygen sensor in a tube attached to the burner. The interface power prototype was made with the inclusion of the frequency inverter to control the rotation of the combustion fan. With the completion of the implementation of instrumentation, interfaces and power of the prototype, inserted the supervisory system tool developed with Delphi in the dryer industrial computer, which contains the paintings concerning monitoring of sensors and controller parameterisation. With the study of the behavior of the process in question, was carried out a mathematical model by analyzing the experimental data of the dryer. From this, it was developed the design and control strategy, and the algorithm of control. The theoretical model of the control system was implemented in a microcontroller. There were simulations of the theoretical model of control to validate the same on the stability, both in temperature, when in stoichiometry. After the validation of control by the simulations carried out, has been implemented in the prototype dryer. Over a pre-determined period has been analyzed the behavior of the dryer with the prototype, to compare with the original gains tied to the stage of drying as: increasing the quality of the final ceramic goods and reduce consumption of natural gas. It was concluded that the work has reached the goals, because the validation of the developed control was confirmed by checking the stability of temperature and stoichiometry, increase the quality of the final pieces of ceramics and reducing emission levels of pollutants compared to the original system dryer.

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

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enfoque do Problema do Controle de Temperatura e Combustão em Secadores Verticais	2
1.2	Objetivo Geral.....	2
1.3	Objetivos Específicos.....	2
1.4	A Organização do Trabalho.....	3
2	APRESENTAÇÃO DO PROCESSO CERÂMICO E DO PROCESSO DE SECAGEM	4
2.1	Introdução.....	4
2.2	O Processo Cerâmico	4
2.2.1	Secagem de Revestimentos Cerâmicos	7
2.3	Secadores.....	10
2.3.1	Secadores Verticais de Funcionamento Contínuo Rápido	10
2.3.2	Principais Elementos que Compõem o Secador	11
2.3.3	Funcionamento do Secador Vertical	14
2.3.4	Características Técnicas	19
2.4	Classificação das Peças Cerâmicas	20
2.5	Defeitos em Revestimentos Cerâmicos Relacionado a Secagem	22
2.6	Caracterização do Comportamento da Temperatura no Sistema Atual de Secagem....	24
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA COMBUSTÃO.....	26
3.1	Introdução.....	26
3.2	O Problema da Poluição Atmosférica	26
3.3	Combustão.....	27
3.3.1	Teoria da Combustão.....	28
3.3.2	Razões Estequiométricas	29
3.3.3	Excesso de Ar	31
3.3.4	Eficiência da Combustão	33
3.3.5	O Controle do Excesso de Ar	35
3.3.6	Avaliação do Rendimento da Combustão	36
3.4	Limites de Inflamabilidade.....	37
3.4.1	Limites Inferior e Superior de Inflamabilidade	38
3.4.2	Misturas com Diferentes Diluentes	40
3.5	Gás Natural	41
3.5.1	Introdução.....	41
3.5.2	Características do Gás Natural.....	42
3.5.3	Utilização de Gás Natural em Equipamentos Térmicos.....	43
3.5.4	Transmissão de Calor nas Chamas de Gás Natural.....	45
3.5.5	Poluição Relacionada à Utilização do Gás Natural.....	47
3.5.6	Combustão do Gás Natural.....	48
3.5.7	Considerações sobre a Temperatura de Ignição do Gás Natural	50
3.6	Estado da Arte do Controle de Temperatura e Combustão	50

4	IMPLEMENTAÇÃO EXPERIMENTAL	57
4.1	Introdução.....	57
4.2	Sensor de Oxigênio	58
4.3	Termopar	59
4.4	Inversor de Frequência	60
4.5	Microcontrolador	61
4.6	Servo Válvula	63
4.7	Ventilador de Combustão.....	64
4.8	Sistema de Supervisão.....	64
4.9	Fonte de Alimentação.....	65
5	PROJETO DE CONTROLADOR PID PARA TEMPERATURA E ESTEQUIOMETRIA 66	
5.1	Modelagem Matemática do Secador Através da Técnica de Identificação.....	66
5.2	Obtenção do Modelo Matemático do Secador Vertical Cerâmico	67
5.3	Estrutura de Controle Adotada	69
5.4	Ajuste dos Ganhos dos Controladores	71
5.5	Resultados das Simulações e Experimentais dos Controladores	71
6	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	75
6.1	Descrição dos Instrumentos.....	75
6.1.1	Medidor de Vazão	75
6.1.2	Medidores de Emissão de Poluentes	76
6.2	Medições na Chaminé.....	77
6.3	Medições no Queimador	79
6.4	Consumo de Gás Natural.....	83
6.5	Efeitos Sobre a Qualidade Final dos Revestimentos Cerâmicos	84
7	CONCLUSÕES	86
7.1	Sugestões Para Trabalhos Futuros	87
8	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	88
	Apêndice 1: Secador vertical contínuo.....	91
	Apêndice 2: Montagem do cestone nos braços de fixação da corrente.....	92
	Apêndice 3: Circulação de ar e movimentação de peças no secador.....	93
	Apêndice 4: Exemplos de comportamentos da temperatura no secador	94

Lista de Símbolos

A	massa de ar	[kg]
A	área da superfície interna da câmara de combustão	[m ²]
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	
I	integral	
Ki	ganho integral	
Kp	ganho proporcional	
Kd	ganho derivativo	
GN	gás natural	
LI_r	limite inferior ou superior de inflamabilidade na temperatura de interesse	[°C]
LI_{25}	limite inferior ou superior de inflamabilidade a 25°C	
N ₂	nitrogênio	
NO	óxido de nitrogênio	
NO ₂	óxido de nitrogênio	
N ₂ O	óxido de nitrogênio	
O ₂	oxigênio	
P	proporcional	
PD	proporcional derivativo	
PI	proporcional integral	
PID	proporcional integral derivativo	
T_{ar}	temperatura de entrada do ar de combustão	[K]
T_{chama}	temperatura de chama	[K]
V ₂ O ₅	pentóxido de vanádio	

Lista de Símbolos Gregos

λ	relação ar/combustível real e a relação ar/combustível estequiométrica
ϕ	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: Fluxograma do Processo Cerâmico em oito etapas seqüenciais.	5
Figura 2.2: Mecanismos da operação de secagem.	8
Figura 2.3: Contração da peça cerâmica.	9
Figura 2.4: Exemplo de secador vertical contínuo.	11
Figura 2.5: Sistema de transmissão de movimentação dos <i>cestones</i>	12
Figura 2.6: Fixação dos <i>cestones</i> à corrente.	12
Figura 2.7: Acoplamento do mandril no rolo do <i>cestone</i>	13
Figura 2.8: Grades internas de distribuição de ar quente.	14
Figura 2.9: Carga das peças.	15
Figura 2.10: Cestone e os principais elementos de rotação.	16
Figura 2.11: Saída do Secador.	17
Figura 2.12: Injeção de ar quente nas peças cerâmicas.	18
Figura 2.13: Sistema de recirculação de ar e de combustão do secador.	18
Figura 2.14: Servo motor com as válvulas de ar e gás.	19
Figura 2.15: Setor de Classificação das peças Cerâmicas.	21
Figura 2.16: Defeito Ra em peça cerâmica.	22
Figura 2.17: Exemplo de peças com Furo.	23
Figura 2.18: Exemplo de peças com covinha.	24
Figura 2.19: Comportamento Térmico do Secador Vertical Cerâmico.	25
Figura 3.1: Balanço térmico da combustão.	34
Figura 3.2: Emissão de poluentes na combustão.	34
Figura 3.3: Produtos da combustão.	36
Figura 3.4: Efeito da temperatura nos limites de inflamabilidade.	39
Figura 3.5: Limites de inflamabilidade de varias misturas metano/ar/gás inerte.	41
Figura 3.6: Rendimento térmico da fornalha.	46
Figura 3.7: Velocidade da queima e porcentagem de excesso de ar.	49
Figura 3.8: Diagrama esquemático do sistema proposto por Sbarbaro et al. (2002).	51
Figura 3.9: Diagrama esquemático do sistema proposto por Miyamoto et al. (1996).	51
Figura 3.10: O sinal MPPS adquirido e a distribuição espectral, conforme o sistema proposto. .	52
Figura 3.11: Comportamento da temperatura do secador.	53
Figura 3.12: Diagrama esquemático das ligações do sistema instrumentação e controle do forno.	54
Figura 3.13 Convergência dos sinais de concentração de oxigênio e temperatura.	55

Figura 3.14: Concentrações de CO e HC medidas com o analisador de gases durante o teste de controle do sistema experimental.	56
Figura 4.1: Implementação industrial do sistema de instrumentação e controle do secador.....	57
Figura 4.2: Esquema construtivo do sensor de oxigênio de banda larga modelo LSU4.	59
Figura 4.3: Circuito eletrônico de acoplamento do termopar	60
Figura 4.4: Circuito eletrônico de acoplamento do inversor de frequência.....	61
Figura 4.5: Teclado matricial.	62
Figura 4.6: Servo Válvula conectada à válvula do gás natural.	63
Figura 4.7: Ventilador de combustão.	64
Figura 4.8: Telas do sistema de supervisão.	65
Figura 4.9: Fonte de alimentação simétrica.	65
Figura 5.1: Estrutura utilizada na identificação da dinâmica do secador.	67
Figura 5.2: Diagrama de blocos de um controlador PID.	69
Figura 5.3: Estrutura de controle utilizada para determinação dos ganhos.	71
Figura 5.4: Resposta da aplicação de três degraus referente a temperatura.	72
Figura 5.5: Resposta de simulação da aplicação de referência estequiométrica tipo degrau.	73
Figura 5.6: Resposta da aplicação de degrau de temperatura.	73
Figura 5.7: Resposta da aplicação de degrau negativo de temperatura.	74
Figura 5.8: Resposta do comportamento sensor de oxigênio.	74
Figura 6.1: Medidor de vazão instalado na planta.	75
Figura 6.2: Valores médios das concentrações de O ₂ (percentual).	80
Figura 6.3: Valores médios das concentrações de CO ₂ (percentual).	81
Figura 6.4: Valores médios das concentrações de CO (em ppm).	81
Figura 6.5: Valores médios das concentrações de HC (em ppm).	82

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Características técnicas do secador vertical EVA 140.	20
Tabela 2.2: Pontos de Análise para classificação das peças cerâmicas.	22
Tabela 3.1: Condições de λ e de ϕ para mistura pobre, rica e estequiométrica.	30
Tabela 3.2: Valores usuais do coeficiente de excesso de ar.	31
Tabela 3.3: Limites de inflamabilidade de alguns combustíveis no ar.	38
Tabela 3.4: Comparação de limites de inflamabilidade no ar e em oxigênio.	40
Tabela 3.5: Composição do Gás Natural Boliviano.	43
Tabela 3.6: Características físico-químicas do gás natural (20° C, 1 atm).	43
Tabela 3.7: Emissões de poluentes dos combustíveis industriais (kg/tep, kg/107cal)	47
Tabela 3.8: Porcentagem de excesso de ar e resultado de combustão.	49
Tabela 3.9: Temperatura de ignição espontânea de alguns combustíveis em ar.	50
Tabela 3.10: Exemplo do sistema de regras utilizado na lógica Fuzzy de Fogarty e Bull (1995).	53
Tabela 4.1: Dados técnicos do microcontrolador PIC 16F877A.	62
Tabela 5.1: Características das respostas dos controladores.	70
Tabela 6.1: Características técnicas do analisador de gases de combustão TEMP50.	76
Tabela 6.2: Características técnicas do analisador de gases de combustão TM132.	76
Tabela 6.3: Valores de O ₂ , CO ₂ , CO e HC para combinações de abertura da válvula de gás e rotação do ventilador de combustão.	78
Tabela 6.4: Valores medidos referentes às concentrações de O ₂ , CO ₂ , CO e HC.	79
Tabela 6.5: Valores medidos aplicando o controle estequiométrico, referentes às concentrações de O ₂ , CO ₂ , CO e HC.	83

1 INTRODUÇÃO

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 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 afaste-se das situações de melhor qualidade de combustão em termos de emissões de poluentes.

A grande oferta existente no mercado de pisos e azulejos cerâmicos e, em conjunto a crescente exigência por parte dos clientes, faz com que a qualidade final dos revestimentos cerâmicos seja um fator decisivo para a competitividade do produto.

Um dos parâmetros que afeta a qualidade dos revestimentos é a secagem, que tem influência marcante sobre a qualidade final das peças cerâmicas. Essa etapa ocorre após a prensagem das peças, que inclui a retirada do excesso de umidade, de forma a uniformizá-las antes da entrada no forno. Esta secagem é realizada geralmente por secadores, cujo ar quente circula entre as peças a uma determinada temperatura e velocidade. Considera-se a secagem uma etapa fundamental dentro de uma linha de produção, sendo responsável pelas dimensões finais do produto e pela presença de defeitos estéticos.

O correto funcionamento do secador assegura peças uniformes, menor desperdício e maior qualidade. Para atingir esse objetivo se faz necessário controlar a temperatura no interior do secador com valores pré-determinados pelo ceramista, independente das variações de carga e eventuais paradas na linha de produção.

O presente trabalho terá como objeto de estudo o controle da umidade das peças processadas pelo secador do tipo vertical, localizado na Unidade II da Eliane Revestimentos Cerâmicos em Cocal do Sul – SC, comandado por dois controladores analógicos com ações de controle proporcional mais integral.

O sistema de medição de temperatura realiza-se através de termopares e do controlador que atua sobre uma servo válvula, a qual regula a dosagem de gás natural enviado ao queimador. Os ventiladores responsáveis pela recirculação do ar não possuem controle de velocidade. Este sistema possui dois pontos de operação, o primeiro, a 135°C utilizado quando a linha de produção trabalha em velocidade normal; o segundo, a 90°C atua nos momentos em que a linha de produção pára e um conjunto de peças permanece no secador por mais tempo que o especificado.

A realização deste trabalho demanda da necessidade de melhorias nas áreas de consumo e

diminuição de emissões, que desperta uma acirrada concorrência entre as empresas, provocando uma busca incessante por maior qualidade e menor custo dos produtos e serviços. Esses fatores aliados a crescente escassez dos recursos naturais, impulsionam a reestruturação de equipamentos, para adequarem-se às necessidades atuais. Com isso, a eficiência e a flexibilidade dos meios produtivos e gerenciais tornam-se fatores decisivos ao sucesso das empresas.

Baseado nas pesquisas com implementações em projetos digitais, as estruturas dos controladores PID (proporcional, integral, derivativo) favorecem a aplicação de algoritmos que permitem a otimização do desempenho, diferente das arquiteturas analógicas originais. Muitas das novas capacidades dos controladores PID digitais estão sendo introduzidas por pesquisadores da comunidade acadêmica para controle de plantas industriais. Neste contexto, busca-se no âmbito do presente trabalho, superar as deficiências do controle térmico do secador e introduzir um novo sistema, capaz de controlar tanto a temperatura, quanto a combustão e emissões de gases poluentes.

1.1 Enfoque do Problema do Controle de Temperatura e Combustão em Secadores Verticais

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 fazer que a mesma ocorra em uma relação ar/combustível adequada, pois uma variação na demanda por potência calorífica está associada a alterações na vazão de gás (e/ou de ar), que pode fazer a relação ar/combustível afastar-se das situações de melhor qualidade de combustão em termos de emissões de poluentes.

1.2 Objetivo Geral

Desenvolver um controlador de temperatura e combustão específico para o secador vertical Eva 140, atribuindo a este equipamento uma nova abordagem de controle, que visa sanar as deficiências na estabilidade térmica e estequiométricas do gás natural e, assim, reduzir os custos e desperdícios devido às deficiências de funcionamento deste equipamento.

1.3 Objetivos Específicos

As principais etapas deste trabalho são:

- Identificar e mapear as condições de operação do secador;
- Caracterizar o funcionamento da servo válvula do gás;
- Modelar o funcionamento do secador (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 o método de controle original aplicado ao secador;
- Reduzir as emissões de poluentes para a atmosfera;
- Diminuir o consumo de gás natural;
- Redução das perdas no processo produtivo, ocasionadas pelas oscilações de temperatura no secador, que refletem no processo em defeitos de “cavinha¹, furo², Ra³” e quebra de peças.

1.4 A Organização do Trabalho

No Capítulo 2, apresenta-se a descrição do processo cerâmico, com ênfase no setor de secagem de peças cerâmicas. Neste capítulo detalha-se o princípio de funcionamento de um secador vertical, citando suas partes, componentes e características técnicas. São descritos os elementos utilizados no sistema de controle de temperatura e de aquisição de dados do processo. No Capítulo 3 aborda-se a fundamentação teórica da combustão, relacionada aos itens do processo de secagem. No Capítulo 4 é feita uma descrição do sistema físico da implementação experimental e seu funcionamento. No Capítulo 5 são realizadas a modelagem e a identificação experimental do sistema; e apresentação do projeto dos controladores para a temperatura e estequiometria em conjunto aos seus respectivos desempenhos. No Capítulo 6 são apresentados os resultados experimentais obtidos nos testes realizados para verificar o desempenho do sistema de controle. No Capítulo 7 são expostas as conclusões do presente trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

¹ Cavinha = pequena depressão que ocorre na superfície da peça.

² Furo = semelhante à furo de ponta de agulha, ocorrendo em toda a superfície da peça.

³ Ra = trinca que aparece nos cantos ou no centro da peça.

2 APRESENTAÇÃO DO PROCESSO CERÂMICO E DO PROCESSO DE SECAGEM

2.1 Introdução

A palavra cerâmica vem do grego *Keramos*, que se referia especificamente ao vasilhame em terracota. Atualmente, este termo é empregado a tudo que se fabrica com matéria-prima argilosa [Kingery, (1998)].

O processo de fabricação de revestimentos cerâmicos é composto de várias etapas, que são executadas seqüencialmente até obter o produto final. Uma dessas etapas denomina-se secagem de peças cerâmicas.

O termo secagem aplicado para produtos cerâmicos é entendido como remoção de água de um material sólido. A secagem de muitos materiais, dos quais a peça cerâmica torna-se um exemplo, é acompanhada por uma redução no volume devido à remoção de água. Esta contração, que depende fortemente da temperatura de secagem, pode causar diferenças no tamanho da peça e defeitos estéticos.

Dos métodos de secagem existentes, pode-se citar a secagem por absorção, por separação mecânica e evaporação. Este último ocorre quando se promove a evaporação de água pela ação do calor. É o método universal de secagem de sólidos, líquidos e, principalmente, de produtos cerâmicos.

Neste capítulo, apresenta-se o processo cerâmico e o funcionamento do sistema de secagem de peças cerâmicas, através da utilização de secadores verticais, citando suas partes, componentes e características técnicas, além de descrever os elementos presentes para o controle térmico do secador.

2.2 O Processo Cerâmico

Cada vez mais, a arte ceramista tem superado limites, seja na criação ou na utilidade das peças de cerâmica. Na Antigüidade, mais precisamente no período da Idade Média até os tempos atuais, a cerâmica tem-se condicionado pelos distintos aspectos da vida cotidiana.

A placa cerâmica pode ser utilizada para revestimentos de pisos, paredes, na forma de azulejos, ladrilhos e pastilhas, tanto em ambientes residenciais, públicos e comerciais como, também, industriais.

O setor ceramista apresenta grande diversidade de produtos, em conseqüência de uma série de possibilidades de processos. Destaca-se a escolha da massa, uma mistura balanceada de

várias matérias-primas, para que apresente comportamento adequado em cada uma das etapas do processo de fabricação e, o produto final possua as propriedades desejadas. Além disso, torna-se importante a forma de preparo, o tipo de conformação da peça, o tipo de acabamento da superfície, o processamento térmico e as características técnicas do produto.

Conforme a Fig. 2.1, o processo de fabricação de revestimentos cerâmicos passa por várias etapas que são executadas sequencialmente até obter o produto final; são elas: dosagem da matéria-prima, moagem, atomização, conformação das peças, secagem, esmaltação, queima e classificação.

As etapas de produção são executadas em série. Estas etapas são basicamente utilizadas para fabricação de qualquer produto cerâmico. Sendo estas iniciadas com a extração da matéria-prima necessária para preparação das massas, bem como, seu armazenamento.

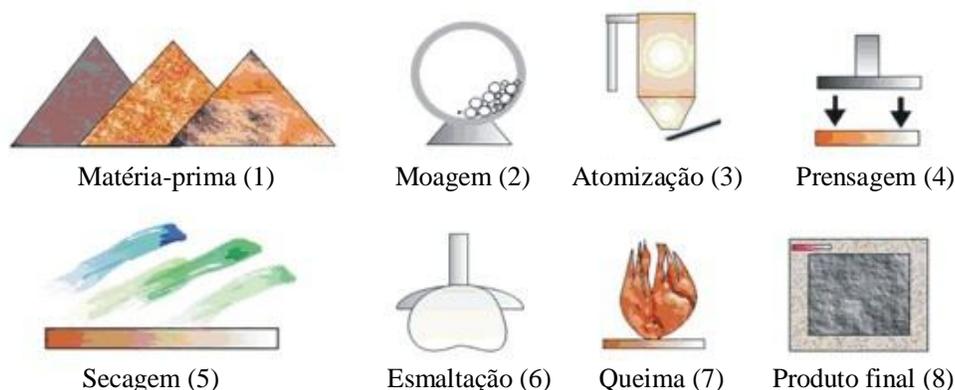


Figura 2.1: Fluxograma do Processo Cerâmico em oito etapas sequenciais.

Na indústria ceramista, a fabricação de revestimentos utiliza uma grande variedade de matérias-primas, todas encontradas na natureza, constituídas por dois tipos de materiais principais, os argilosos e os não-argilosos [Kingery, (1998)].

Depois da realização das etapas de extração e armazenamento da matéria-prima inicia-se o processo de dosagem de cada componente da massa, que será submetida à moagem, realizada por moinhos.

Após a moagem, a massa formada com água, que consiste em um líquido espesso com densidade e viscosidade altas, com resíduo baixo e aspecto de chocolate líquido, é denominada barbotina. A barbotina, após passar por peneiras é bombeada para o atomizador (secado por pulverização). Ao atingir os bicos do secador por pulverização a barbotina é atomizada, sob a forma de esguicho de gotículas (formando um leque), que em contato com o ar quente ($\pm 600^{\circ}\text{C}$)

da câmara do atomizador perde 93% de sua água, formando a partir deste ponto o chamado pó atomizado. Este cai por gravidade sobre correias transportadoras que o leva para os silos de armazenagem. No silo, a massa permanece por 48h para homogeneização. A partir deste ponto, a massa atomizada está pronta para ser prensada [Modesto e Menegali (2001)].

A próxima etapa do processo denomina-se prensagem, que consiste na compactação da massa atomizada sobre um molde através da pressão de um punção. Este processo serve para assentar e colocar os grãos da massa em contato sobre pressão. Ocorrem três operações simultaneamente nesse processo: conformação da massa, que garante a forma do corpo cerâmico cru; a compactação do material, que define a resistência a cru, fundamental para que a peça possa prosseguir adequadamente ao processo e suportar os choques mecânicos que ocorrem; e a redução dos vazios existentes entre as partículas da massa.

A etapa de secagem é de grande importância em uma linha de produção ceramista. Executa-se a secagem após a prensagem das peças, pois assim, o excesso de umidade é retirado, com o intuito de uniformizar as peças antes da entrada no forno. Nessa etapa, a umidade média passa da faixa de 5,5 a 6,5% para valores inferiores a 1%. Os objetivos principais dessa operação consistem em aumentar a resistência mecânica do produto, garantir a uniformidade térmica superficial, distribuir de forma homogênea a umidade nas peças e assegurar que a temperatura de descarga mantenha-se constante ao longo do tempo.

A secagem é realizada normalmente por secadores do tipo vertical contínuo, cujo ar quente circula entre as peças a uma determinada temperatura e velocidade. Considerada uma das principais etapas responsáveis pelas dimensões finais do produto e pela presença de defeitos estéticos tais como, “Covinha, Furo e Ra”. Utiliza-se o ar quente para favorecer a difusão da água de dentro para fora da peça e a evaporação da água da superfície.

A esmaltação das peças cerâmicas é realizada em um processo contínuo (linha de esmaltação). Os métodos de aplicação mais usados na fabricação destes produtos cerâmicos são: pulverização, cascata ou cortina (cortina de aplicação), a seco ou decoração (serigrafia). Este tratamento é executado para conferir ao produto queimado uma série de propriedades técnicas e estéticas. O esmalte (cru) é uma mistura homogeneizada de materiais que são aplicados sobre a peça e, com a queima, funde-se, formando uma massa vítrea compacta. O esmalte já queimado deverá ser insolúvel em água, ácidos e bases de uso freqüente, bem como, impermeável e duro. Para a produção dos esmaltes são utilizados compostos minerais, cujos componentes básicos são: elementos fundentes (chumbo, magnésio, cálcio e sódio), opacificadores e refratários, que determinam as propriedades finais do vidro (estanho, zinco, zircônio e alumínio) e vítreas, as quais formam o corpo do esmalte (quartzo e feldspato) [Modesto e Menegali (2001)].

Na indústria ceramista, entende-se por queima o aquecimento de acordo com um plano pré-estabelecido das peças moldadas, seguido de um resfriamento conforme um procedimento definido. Esta etapa é essencial para o processo de obtenção de revestimentos cerâmicos, pois provoca modificações fundamentais em suas propriedades, tornando a peça um material duro, resistente à água e aos produtos químicos, com a redução da porosidade, além de proporcionar a diversificação da aplicação da mesma, com excelentes características técnicas. Na etapa de queima, as falhas decorrentes de outras fases aparecem com clareza. Após a queima, ocorre a classificação dos defeitos estéticos (borrado⁴, falha de véu⁵, furo de esmalte⁶, etc.) e físicos (tamanho, planaridade, etc.) dos revestimentos cerâmicos. Estas classificações são realizadas através de máquinas que as efetuam de forma automática. Posteriormente, na última fase, é realizado o embalamento e a paletização.

2.2.1 Secagem de Revestimentos Cerâmicos

Do ponto de vista industrial, a operação de secagem é uma das etapas mais delicadas e importantes de toda a cadeia produtiva ceramista. A esta operação encontram-se associadas diversas perdas de massa e variações das dimensões do corpo cerâmico. A ocorrência de gradientes térmicos e de umidade durante o processo de eliminação de água, podem ocasionar tensões térmicas geradoras de defeitos nos produtos, como deformações e fissuras, inutilizando ou reduzindo a qualidade do produto.

A umidade é responsável pela plasticidade do material na sua etapa de conformação. Porém, para o restante do processo a umidade é prejudicial, pois a peça após a conformação não pode ser bruscamente aquecida até a temperatura de queima sem correr o risco de partir-se. Isso resulta da umidade contida na peça.

Segundo Modesto e Menegali (2001), a etapa de secagem depende de quatro fatores essenciais:

- Condições do ar insuflado (temperatura e umidade);
- Quantidade média de ar que está em contato com o material a secar;
- A superfície específica do material, ou seja, a relação superfície/volume;
- A natureza da superfície do material.

⁴ Borrado = falha na aplicação da tinta pela serigrafica.

⁵ Falha de véu = aplicação incompleta de esmalte ou engobe na peça cerâmica.

⁶ Furo de esmalte = esmalte contaminado por ferro.

A transferência de energia (calor) pode ocorrer por convecção, condução, radiação, ou ainda por uma combinação destas formas. Na maioria dos casos, a etapa de secagem é feita por convecção.

Quando o ar quente entra em contato com a peça cede-lhe parte de sua energia, que é utilizada para elevar a temperatura da peça úmida e transformar o líquido em vapor. Incorporado ao ar, o vapor aumenta a sua umidade absoluta (massa de água por unidade de massa de ar seco). A parte restante da energia não utilizada pelo ar de secagem é dividida em duas frações: uma é transmitida para o equipamento de transporte dos produtos, que tem sua temperatura aumentada entre a entrada e a saída do secador; outra, ao exterior devido à insuficiência do isolamento e à falta de estanqueidade do secador (fugas de ar quente ou entrada de ar frio). Assim, a energia útil efetivamente usada para transformar o líquido em vapor representa apenas uma parcela do total da energia cedida pelo ar de secagem. O restante é considerado energia perdida. Isto geralmente resulta em um rendimento térmico total da operação de secagem por convecção inferior a 60%.

Conforme a Fig. 2.2, a execução da secagem necessita da geração de calor, que é passado ao ar, aquecido a uma determinada velocidade, assim ocorre a troca de calor entre o ar aquecido e a peça.

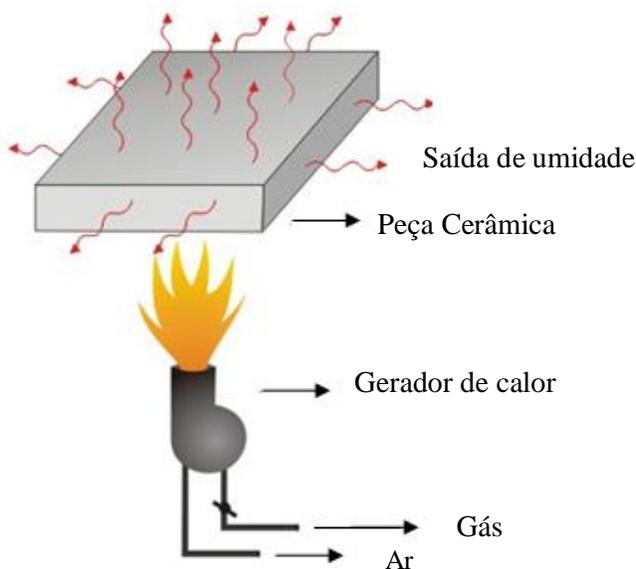


Figura 2.2: Mecanismos da operação de secagem.

A etapa de secagem é acompanhada por uma contração. A Fig. 2.3 apresenta um esquema do comportamento de uma massa cerâmica no processo de secagem. No início da secagem, todas as partículas de argila da massa estão cercadas por água. Com a liberação desta água, as partículas aproximam-se e a massa retrai. Assim, na primeira fase da retração, o volume decrescido do produto úmido é proporcional a diminuição do volume de água. No decorrer da

secagem, as partículas aproximam-se progressivamente até, finalmente, encostarem-se. Com a manutenção do processo de secagem, a retração continua a uma taxa menor, uma vez que a perda de água passa a ser parcialmente compensada pela formação de poros. Este período é definido como a segunda fase de retração. Uma secagem adicional aumenta o volume do poro, porém o volume total da peça permanece constante.

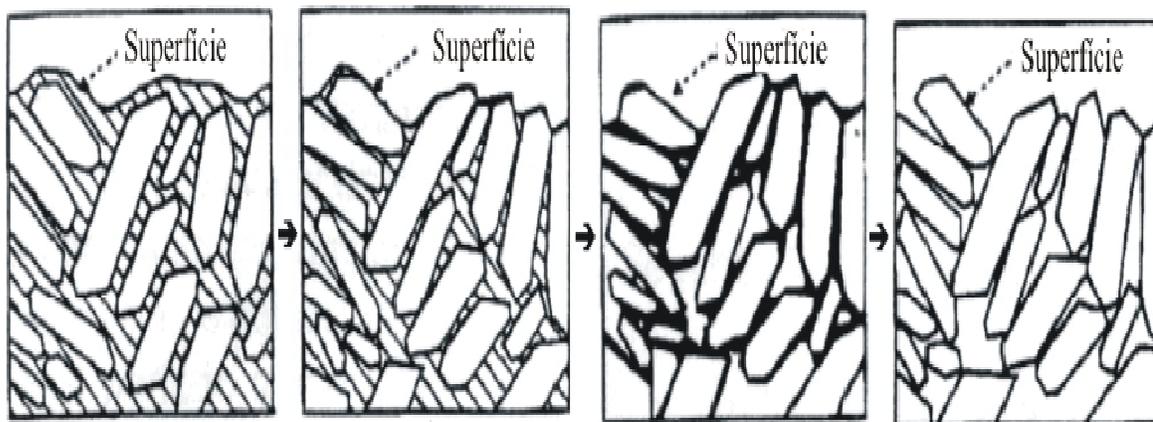


Figura 2.3: Contração da peça cerâmica. Fonte Modesto e Menegali (2001).

Segundo, Modesto e Menegali (2001), os principais objetivos da etapa de secagem são:

- Aumento da resistência mecânica do produto: essencial para que a peça possa suportar os choques mecânicos no decorrer do restante do processo de fabricação;
- Garantia da uniformidade térmica superficial e de uma distribuição homogênea da umidade nas peças: são necessárias para que a absorção do líquido das suspensões de vidrados se processe uniformemente em toda superfície, de modo que a espessura do esmalte seja uniforme;
- Garantia de temperatura de descarga estáveis ao longo do tempo: a exigência da temperatura constante dos produtos descarregados do secador relaciona-se a necessidade de garantir que as condições de formação da camada de vidrado sejam constantes e sua consistência adequada.

Na secagem, junto à evaporação de água residual, ocorre um aumento da resistência mecânica das peças cerâmicas, atribuído a um aumento de densidade causado pelo empacotamento e atração de partículas, que eleva as forças de ligação entre as mesmas.

2.3 Secadores

São equipamentos que normalmente por meio de calor efetuam secagem de materiais. Podem ser classificados de diversas maneiras. Dentre elas, utiliza-se neste texto a seguinte classificação [Bristot, (1996)]:

a) baseado no sistema de alimentação do material a secar:

- funcionamento estático ou intermitente;
- funcionamento contínuo.

b) baseado no sistema de aquecimento:

- aquecimento por convecção;
- aquecimento por condução;
- aquecimento por irradiação;
- aquecimento misto.

Para a secagem de materiais cerâmicos, utiliza-se em geral secadores que trabalham por circulação de ar quente. Nesse processo, o ar eleva a temperatura da água presente na peça até a sua mudança de estado e, assim, até a evaporação da mesma. Esta etapa deve ser muito bem controlada, pois oscilações térmicas podem gerar trincas e até mesmo a quebra da peça.

Um secador industrial eficiente deve apresentar características que garantam, além de uma eficiência térmica adequada, umidade residual baixa, ausência de defeitos de secagem (fissuras e deformações) e temperatura de descarga dentro dos padrões requeridos pela esmaltação.

É necessário que os equipamentos destinados a realizar esta etapa de secagem devem ser confiáveis e flexíveis para atender às diferentes características de cada indústria. Os secadores verticais contínuos são mais utilizados na indústria de revestimentos cerâmicos, devido ao seu tamanho, velocidade de ciclo e funcionamento inteiramente automatizado.

2.3.1 Secadores Verticais de Funcionamento Contínuo Rápido

Os secadores estudados neste trabalho são do tipo vertical. Estes secadores são equipamentos cuja carga e descarga do material ocorrem de maneira contínua e automática e, os mesmos mantêm um processo de secagem contínuo sobre o material. Na Fig 2.4 é apresentado um exemplo de secador vertical contínuo.



Figura 2.4: Exemplo de secador vertical contínuo. Fonte Eliane Revestimentos Cerâmicos, secador EVA 140-Sacmi, instalado na Unidade II.

2.3.2 Principais Elementos que Compõem o Secador

Para o entendimento do processo de secagem e, conseqüentemente, dos processos termodinâmicos que ocorrem no interior do secador, é importante analisar os seus componentes e a forma de funcionamento. No Apêndice 1 é apresentado o desenho esquemático de um secador vertical cerâmico, com destaque nos seus principais elementos.

As paredes externas do secador são constituídas por uma série de placas, formando uma parede de chapa dupla com interstício de lã de rocha, compondo o sistema de isolamento térmico. As placas encontram-se fixadas à estrutura mediante os relativos parafusos, de modo a permitir o acesso às partes da máquina para inspeções e manutenções, conforme indicado no Apêndice 1. A estrutura externa de sustentação é construída em aço de grande espessura, posteriormente, fixada sobre uma fundação de concreto.

O elemento motriz está localizado na parte superior da estrutura, responsável pela movimentação dos *cestones*. Este sistema é composto por um motoredutor, situado na parte superior do secador, (vide Apêndice 1), que se encontra ligado diretamente ao eixo de movimentação dos *cestones*, através de um acoplamento rígido de lingüeta, bloqueado por meio

de um braço duplo de reação, conforme a Fig. 2.5. O movimento do eixo é transmitido pelo motor de auto-travamento, alimentado por um acionamento com inversor de frequência, a fim de obter a máxima precisão e segurança.



a) Conjunto de movimentação do eixo. b) Eixo de movimentação dos *cestones*.

Figura 2.5: Sistema de transmissão de movimentação dos *cestones*.

A corrente movimenta-se entre as guias de aço montadas no percurso de movimentação ao longo da estrutura do secador, assim, possui como função a movimentação dos *cestones* ao longo do ciclo de secagem. O seu processo é iniciado com a transmissão da movimentação pelo eixo. A corrente é construída com pinos e aros de aço de alta resistência, preparados para lubrificação automática, que é realizada pelo interior dos pinos, na corrente estão fixados os braços, através destes são fixados os *cestones*. Estes, por sua vez, possuem vários planos fixos por onde são carregados e descarregados os revestimentos cerâmicos. O movimento ocorre em sentido anti-horário, de forma a evitar choques bruscos de temperatura às peças cerâmicas e, possibilitar a saída da umidade de modo gradativo, reduzindo assim os defeitos. A Fig. 2.6 representa a fixação dos *cestones* à corrente através dos braços que compõem a corrente.

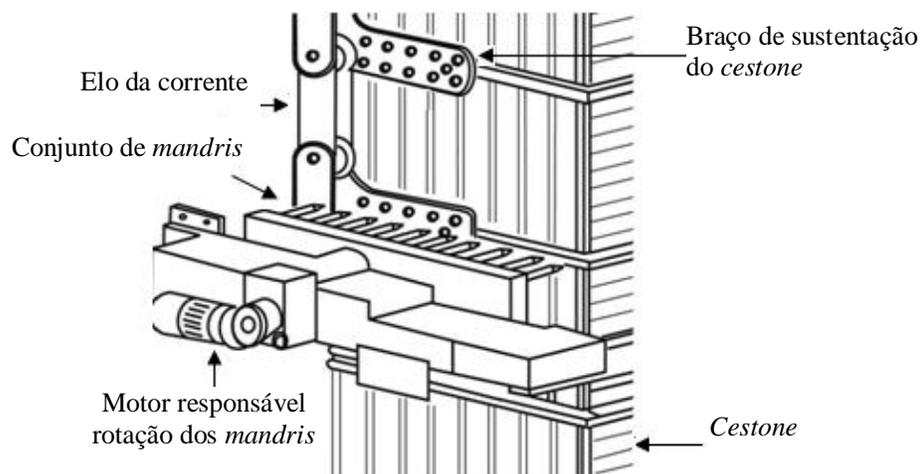


Figura 2.6: Fixação dos *cestones* à corrente.

Os *cestones* são construídos por uma estrutura de aço, com duas bordas laterais feitas em chapa metálica, conforme o Apêndice 2. Nestas chapas há uma série de filas de furos em que se apóiam os rolos, deste modo, constituem as prateleiras onde serão carregadas as peças a secar, a qual possibilita a circulação de ar quente. Os rolos possuem uma extremidade expandida com a finalidade de não sair das chapas de apoio e facilitar a introdução das pontas do grupo de *mandris*, que realizam o acionamento dos mesmos. Os *cestones* são montados de forma bascular nos braços da corrente, de acordo o Apêndice 2, através de dois pinos laterais feitos de aço temperado. O sistema de guias garante o correto posicionamento dos *cestones* durante todo o seu trajeto no secador.

Os *mandris* são responsáveis pela rotação dos rolos, para que aconteça a carga e descarga das peças. A rotação é realizada mediante a introdução das pontas situadas em lados paralelos do *cestone*, que avançam e encaixam-se nas extremidades abertas da fila de rolos posicionada na superfície da carga. Desta maneira, os rolos que sustentam as peças secas são elevados, rotacionados pelo motor dos *mandris*, conforme a Fig 2.7. Com isso, os rolos são rotacionados e provocam a saída do material seco e a entrada dos recém prensados. Torna-se importante salientar que as operações de carga e descarga são executadas simultaneamente.

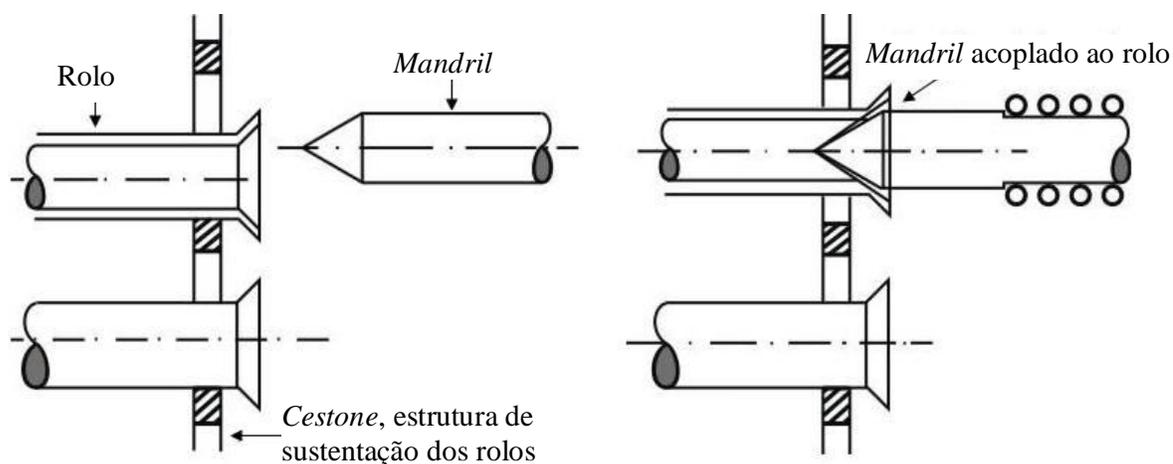


Figura 2.7: Acoplamento do mandril no rolo do *cestone*.

As canalizações internas são constituídas por grades especiais, com fendas horizontais reguláveis, responsáveis pela distribuição de ar quente nas diversas zonas do secador, de acordo com a Fig. 2.8. O recirculador de ar possui um motor elétrico responsável pelo acionamento de um rotor através de correias e polias, como mostra o Apêndice 1. Este rotor aspira o ar da parte interna do secador através de uma tubulação e, o envia para o gerador de calor. Assim, retorna para o processo com a temperatura próxima da ideal utilizada para a secagem das peças

cerâmicas. A tubulação é isolada termicamente com lã de rocha para evitar desperdício de calor.



Figura 2.8: Grades internas de distribuição de ar quente.

O queimador, através da queima do gás natural, libera energia térmica, a qual é responsável pelo aquecimento do ar, este aquecimento serve para que ocorra a diminuição da umidade residual da peça. A chama é regulada na câmara do queimador mediante um sistema de regulação de gás, de acordo com a temperatura desejada nas zonas de secagem, do tipo “veia de ar”, dotado de todas as seguranças previstas nas normas internacionais de combustão. Os cilindros pneumáticos das comportas de recirculação principal e recirculação de ar de estabilização podem ser acionados de forma automática ou manual.

A renovação do ar saturado e úmido por ar limpo e seco é realizado por um ventilador que extrai o ar úmido e envia-o para o meio externo, através de um tubo metálico denominado chaminé, conforme o Apêndice 1. O qual possui uma válvula para regulação do controle da saída de ar úmido.

A instalação elétrica garante a segurança e o melhor desempenho do secador. Os cabos são protegidos por bainhas e colocados em eletrocalhas fechadas. Cada linha de alimentação dos motores é protegida contra sobrecargas, curto-circuito e outras anomalias. Dessa maneira, evitam-se distúrbios que possam causar irregularidades no funcionamento do secador.

2.3.3 Funcionamento do Secador Vertical

O transporte das peças conformadas na prensa até a entrada do secador realiza-se por meio de rolos e pode ser dividido em quatro seções, comandados por quatro diferentes motores elétricos.

A primeira e a segunda seção de rolos funcionam ininterruptamente, pois não param nas situações de formação de filas. No início da terceira série de rolos há dois sensores ópticos alinhados, que verificam se a fila está completa e alinhada. Caso contrário, a linha pára e só retorna a operar quando as peças forem realinhadas. Após as peças serem alinhadas, realiza-se o acionamento do motor, que leva as peças até o início da quarta seção de rolos, em uma parte comum a dois motores distintos, e então o motor pára. Quando ocorre a chegada de outra fila de peças, o mesmo ocorre, porém, nesta situação o motor que movimentava a quarta sessão de rolos é acionado junto à terceira seção pela mesma ação. Com isso, forma-se o pacote com duas filas, posteriormente, introduzido nos *cestones*, conforme a Fig. 2.9.

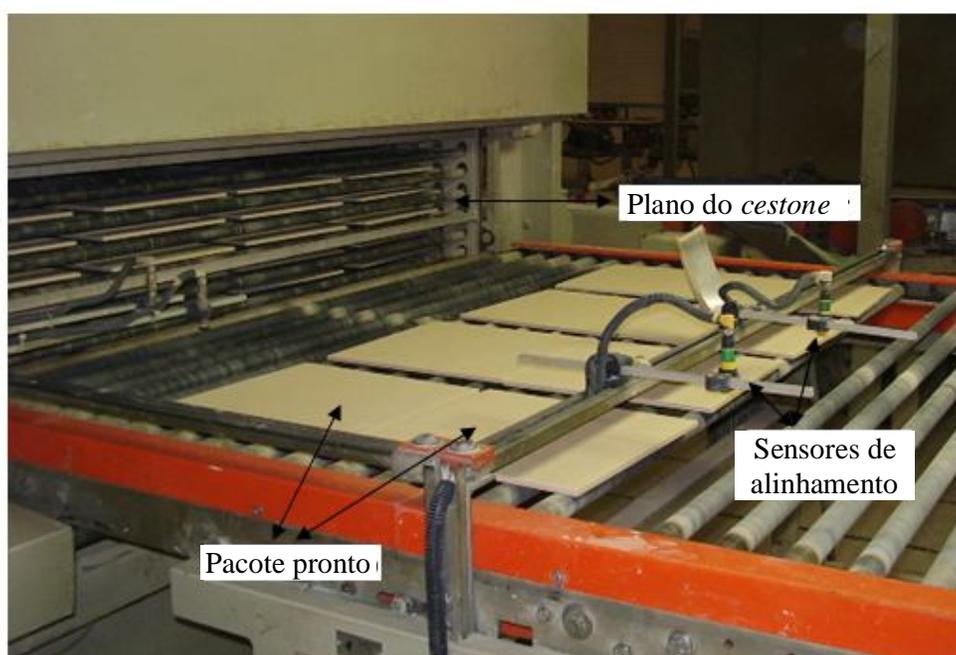


Figura 2.9: Carga das peças.

Nestes secadores, as peças são transportadas por meio de *cestones* (espécie de caixas com planos de rolos) e, sobre seus planos são carregados e descarregados os revestimentos cerâmicos. Os rolos que compõem os planos são movimentados por dois motores dispostos ao lado dos *mandris*. A Fig. 2.10 mostra de maneira detalhada os componentes envolvidos nessa operação. Esses motores são comandados por sinal provindo de um sensor óptico que detecta a aproximação do conjunto de peças na quarta seção de rolos, conforme a Fig 2.9. Os motores movimentam os rolos em um tempo determinado. Este processo faz com que as peças secas sejam retiradas do plano e que outras peças ainda úmidas sejam introduzidas no mesmo local.

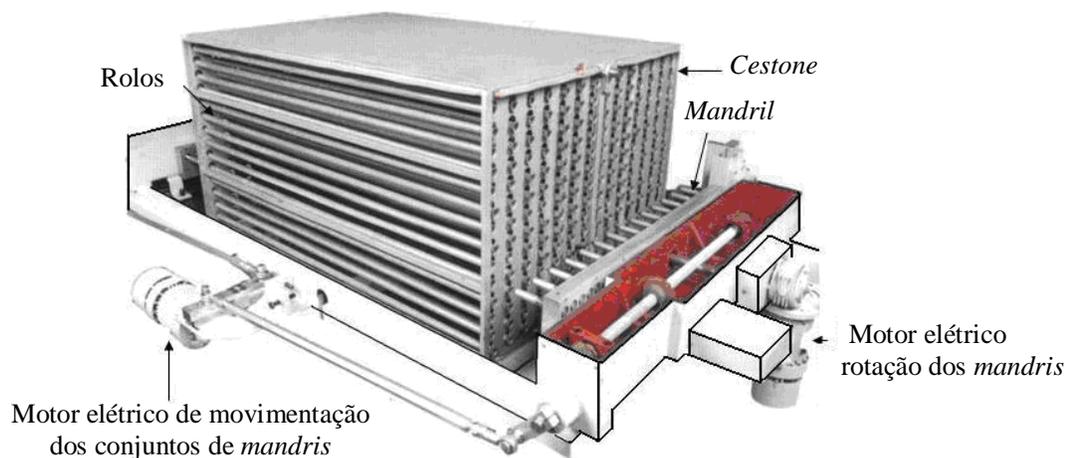


Figura 2.10: Cestone e os principais elementos de rotação.

O mandril abre-se após o ciclo de entrada das peças, permitindo assim, a movimentação dos *cestones*. É importante salientar que quando o *mandril* está fechado um sensor indutivo mantém-se acionado, funcionando como uma chave de segurança, isso impede a movimentação.

Quando o *mandril* se abre, aciona-se outro sensor indutivo que permite a descida do *cestone*. Com esse movimento, um novo plano de rolos é deixado na posição correta, sendo esta, detectada através do acionamento de um sensor de fibra óptica que identifica os cames de parada ao lado do *cestone*. Dessa forma, o *cestone* pára na posição correta. Para a retirada das peças secas e para a entrada de outras no ciclo de secagem, ativa-se o mesmo sensor que faz o acionamento do motor fecha o *mandril*. Com o *mandril* fechado segue o ciclo de introdução do pacote de peças. Por outro lado, com o *mandril* aberto o ciclo de movimentação dos *cestones* prossegue.

Os *cestones* estão ligados por meio de duas correntes, as quais, através de uma embreagem mecânica, movimentam-se devido a transmissão de rotação ao conjunto por meio de um motor elétrico. Após um ciclo no secador, a saída das peças secas ocorre através do giro dos rolos do plano do *cestone*. Assim, as peças são posicionadas sobre o *bancalino*, que são introduzidas através de uma série de rolos, movimentados intermitentemente por um motor elétrico.

A saída do secador é constituída por dois conjuntos de rolos, que apresentam dois sensores ópticos. O primeiro, ao identificar a fila de peças, envia um sinal para o sistema de controle interno que faz parar os rolos. O sensor emite um sinal, que faz com que o *bancalino* suba por efeito do acionamento de um cilindro pneumático (conforme Fig. 2.11). As correias do *bancalino* estão em constante movimentação, pois são ligadas à linha de esmaltação. Assim que a fila de peças sai do secador, os dois sensores ópticos são desacionados e ocorre o abaixamento

do *bancalino*. Dessa maneira, a outra fila de peças é movimentada até o *bancalino*, que sobe e coloca as peças na linha de esmaltação.



Figura 2.11: Saída do Secador.

O secador vertical em estudo funciona continuamente. Em relação ao seu funcionamento interno, os secadores contínuos são caracterizados por uma distribuição fixa no tempo e no espaço das condições termo-higrométricas. As peças em seu trajeto podem encontrar variações graduais de condições de secagem. Estes equipamentos apresentam a vantagem que o material ao passar por eles está sempre com o mesmo ciclo de secagem. Como desvantagem pode-se citar o seu alto custo. [Lehmkuhl (2004)].

Nos secadores de funcionamento contínuo, o aquecimento ocorre por convecção. A peça cerâmica a ser secada entra em contato com uma corrente de ar quente durante o seu lento movimento entre a entrada e a saída do secador. Neste caso a secagem ocorre em contracorrente, pois um fluxo de ar vai de encontro às peças a serem secadas. Devido a este princípio, ao entrar no secador as peças cerâmicas ainda úmidas são cobertas por ar moderadamente quente. Durante esta etapa, as zonas ficam cada vez mais quentes e as peças tornam-se cada vez menos úmidas. O Apêndice 3 apresenta o desenho esquemático do fluxo de circulação, tanto do ar como, da movimentação de peças no secador.

O ar quente proveniente do gerador de calor mistura-se com o ar de recirculação e juntos são injetados na câmara do queimador, por onde se distribuem no equipamento. A seguir, este ar quente passa por meio de aberturas denominadas de *serrandas*, que podem ser reguladas manualmente na parte externa do secador e, entra em contato com o conjunto de peças, conforme a Fig 2.12.

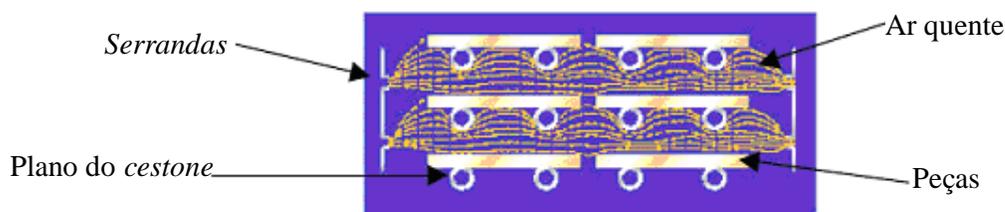


Figura 2.12: Injeção de ar quente nas peças cerâmicas.

O sistema de recirculação de ar é composto de um ventilador que puxa o ar contido no interior do secador e o injeta no queimador, de acordo a Fig 2.13. A recirculação de ar é importante para que se consiga o máximo de reaproveitamento do calor [Sacmi, (1996)].

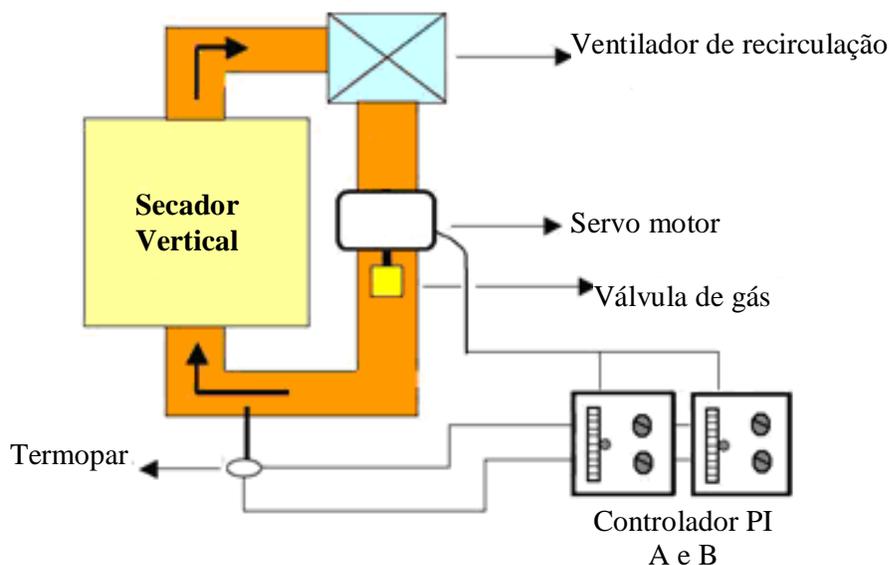


Figura 2.13: Sistema de recirculação de ar e de combustão do secador.

O sistema de controle de temperatura do secador opera com um termopar que mede a temperatura de aquecimento do secador e envia o sinal para o controlador, que processa o algoritmo do tipo PI (proporcional e integral).

Ao todo, este processo possui dois controladores PI. Quando a linha de produção está operando, um dos controladores é acionado e, quando a linha de produção pára; o outro por sua vez entra em funcionamento. Estes controladores enviam um sinal de controle para o servo motor (vide Fig. 2.14), visando corrigir a relação ar/gás do sistema, para atingir a temperatura solicitada.

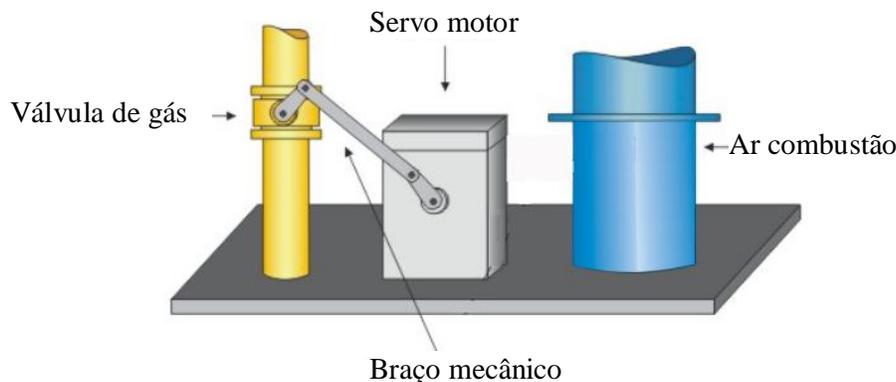


Figura 2.14: Servo motor com as válvulas de ar e gás.

As maiores oscilações térmicas de um secador contínuo devem-se às variações da sua carga e do tipo de produto. Geralmente, um secador é dimensionado pela necessidade de calor, quantidade de ar de alimentação e recirculação, em função do tipo mais importante de produto e baseado na produção diária desejada e do ciclo mínimo previsto.

Segundo Biffi (2000), as interferências na estabilidade térmica podem ocorrer devido aos seguintes fatores:

- Temperatura do ar: o ar de secagem é o portador da energia suficiente para evaporar a água. A velocidade de secagem aumenta proporcionalmente à temperatura do ar;
- Umidade relativa: à medida que a umidade relativa do ar aumenta, diminui a velocidade de secagem;
- Velocidade de circulação do ar: a transferência de matéria e energia nos produtos cerâmicos depende da velocidade do ar. À medida que a velocidade do ar aumenta, diminui a resistência. Devido ao seu baixo valor, a influência da velocidade do ar é desprezível no período de velocidade de secagem constante;
- Espessura da peça: quanto maior for a espessura das peças, mais lenta é a secagem.

Durante o período de velocidade de secagem constante, a espessura das peças não interfere na velocidade, já que a evaporação desenvolve-se na superfície. Contudo, no período decrescente, a velocidade de secagem é inversamente proporcional à espessura das peças cerâmicas.

2.3.4 Características Técnicas

As principais características técnicas do secador vertical EVA 140 estão apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Características técnicas do secador vertical EVA 140.

Potência elétrica instalada [kW]	23
Potência térmica instalada [kW]	697,19
Temperatura máxima de secagem [°F]	473,15
Pressão da linha de combustível [Mpa]	0,05 – ,78
Pressão da rede de ar comprimido [Mpa]	0,5 – 0,6
Combustível	Gás natural
Umidade máxima de entrada das peças cerâmicas [%]	8
Umidade de saída das peças cerâmicas [%]	0,5
Número total de <i>cestones</i>	34
Número de planos por <i>cestones</i>	13

2.4 Classificação das Peças Cerâmicas

A competitividade crescente exige um comportamento diferenciado por parte das empresas de revestimentos cerâmicos, para assim ganharem maior espaço no mercado, para tanto é necessário fabricar produtos totalmente confiáveis e seguros. Para isso é de extrema importância que toda inspeção garanta completamente a qualidade dos produtos, contudo, a tarefa de inspecionar a qualidade final dos produtos acabados é realizada manualmente por fiscais setoriais [Bueno et al., (2000)].

Após a etapa de queima das peças cerâmicas apresentam características finais, as quais não podem ser alteradas. Estas são transportadas através da linha de produção para a etapa de classificação (vide Fig.2.15). A separação das peças é realizada com base nas normas ISO 13006 / NBR 13818, que estabelecem uma série de exigências necessárias para que os revestimentos cerâmicos possam receber o Certificado de Conformidade conferido pelo CCB-INMETRO [Melchiades et al., (2001)]. Entretanto as normas citadas acima são sintetizadas no processo de separação através de três métodos, onde através do somatório dos resultados, as peças são separadas por classes:

- Análise superficial: A indústria de revestimentos cerâmicos possui um sistema para inspeção de qualidade superficial realizada por colaboradores, os quais são treinados na fábrica, e executam manualmente. Tais colaboradores realizam a classificação, tendo como parâmetros para a tomada de decisão os seguintes critérios; a conformidade com a tonalidade, características de desenho impresso na peça cerâmica, a existência ou não de cantos quebrados e/ou bordas lascadas. Caso a peça, nesta primeira verificação de qualidade, não apresente os defeitos

mencionados, é classificação nesta etapa com qualidade “A”, caso apresente um ou mais defeitos será classificada com qualidade C (comercial). Em situações de apresentar defeitos de proporções que descaracterize o produto, esta é descartada e reaproveitada na etapa de formulação da massa cerâmica;

- **Análise dimensional:** Na etapa posterior a inspeção visual é executada de maneira automática. Sendo de responsabilidade do fiscal setorial, parametrizar o equipamento denominado *calibro*, o qual através de sensores verifica as características dimensões da peça cerâmica. Esses valores dimensionais são determinados pela engenharia de produto. Sendo compostos tais parâmetros de três tamanhos, que são: P (pequeno), M (médio) e G (grande), os quais apresentam suas respectivas tolerâncias. Caso a peça cerâmica após a análise dimensional, estiver entre os três tamanhos é classificada com qualidade A e o respectivo tamanho, caso contrário é classificada com qualidade C (comercial).

- **Análise de planaridade:** Nesta etapa seguinte a análise dimensional, é realizada de maneira automática a verificação das características de planaridade da peça. Sendo de responsabilidade do fiscal, parametrizar o equipamento denominado *planar*, o qual através de sensores verifica a planaridade da peça cerâmica. Tais valores e tolerâncias são determinados pela engenharia de produto. Nesta análise, a peça cerâmica é classificada em qualidade A, se estiver dentro dos parâmetros estipulados, e qualidade C (comercial) caso um dos pontos exceda aos limites pré estabelecidos ao material.



Figura 2.15: Setor de Classificação das peças Cerâmicas

Com a conclusão destas três inspeções, um conjunto de sinais elétricos formando uma combinação binária é enviado a máquina da classificação e embalagem. Através desta informação, as peças cerâmicas são separadas por tamanho e qualidade e, embaladas em caixas de papelão. Contudo, em intervalos de 30 minutos o inspetor setorial examina duas caixas de

peças cerâmicas, tendo como parâmetros básicos a tabela 1. O objetivo dessa inspeção é eliminar possíveis misturas de classes ocorridas no processo. Caso ocorra uma não conformidade o material classificado no intervalo de 30 minutos e reclassificado.

Tabela 2.2: Pontos de Análise para classificação das peças cerâmicas.

Visuais	Geométricos Dimensionais	Geométricos Planaridade
Defeitos Superficiais	Dimensões dos lados	Curvatura Central
Variação de Tonalidade	Retitude Lateral	Curvatura Lateral
Variação do Desenho	Ortogonalidade	Empeno

2.5 Defeitos em Revestimentos Cerâmicos Relacionado a Secagem

A etapa de secagem consiste em reduzir a umidade residual presente nas peças de revestimentos cerâmicos ao sair do secador, responsável pelo condicionamento imediato e posterior comportamento das peças. Com o objetivo de evitar rupturas, defeitos estéticos e garantir um comportamento mecânico uniforme das peças cerâmicas durante a sua manipulação e transporte é imprescindível assegurar um baixo valor de umidade residual que seja uniforme e estável entre as diferentes peças de uma produção. Para alcançar este propósito é necessário dispor de um método confiável e estável de secagem das peças cerâmicas. Contudo, observa-se que a variação da temperatura de secagem ocasiona oscilações nos valores de umidade residual, que pode favorecer o surgimento de alguns defeitos, tais como:

- Ra: é um defeito proveniente de choques que a peça sofre durante o processo de fabricação. Os choques são causados ao longo da linha de esmaltação até a entrada do forno, sendo indesejados em qualquer processo cerâmico, pois são os responsáveis pelas trincas internas no material. Na etapa de queima, as peças apresentam retração, assim, as trincas propagam-se pela mesma originando os defeitos (vide Fig. 2.16).



Figura 2.16: Defeito Ra em peça cerâmica.

O defeito de Ra está diretamente associado à qualidade da secagem, pois a resistência mecânica conferida pelas peças neste processo deve ser suficiente para que elas realizem adequadamente o percurso até a entrada do forno. Para atender de maneira satisfatória às exigências na saída do secador, a peça deve apresentar uma umidade residual em torno de 0.15%. Essa umidade garante que a peça apresente resistência mecânica suficiente para as etapas subsequentes do processo. Assim, o Ra relaciona-se diretamente com o comportamento térmico do secador, já que uma baixa umidade residual está associada às flutuações de estabilidade da temperatura no secador.

- **Furo:** ocorre após a aplicação do engobe/esmalte na linha de esmaltação. Apresenta relação direta com as características da peça proveniente do processo de secagem. Dessa forma, se a temperatura na saída do secador oscilar constantemente, isto representa um fator de risco pois aumenta a possibilidade da presença desse defeito.

Verifica-se o surgimento do Furo quando a temperatura da peça é superior ao exigido no processo, pois quanto mais elevada a temperatura, maior a probabilidade de aparecer esse defeito. Se o peça cerâmica apresentar uma temperatura muito alta quando é adicionada uma camada úmida de engobe/esmalte, a quantidade de água presente na peça tende a evaporar muito rapidamente, e muitas vezes, o material não suporta essa evaporação rápida espontânea, o que resulta no aparecimento do Furo. A Fig. 2.17 apresenta uma peça cerâmica contendo este defeito.

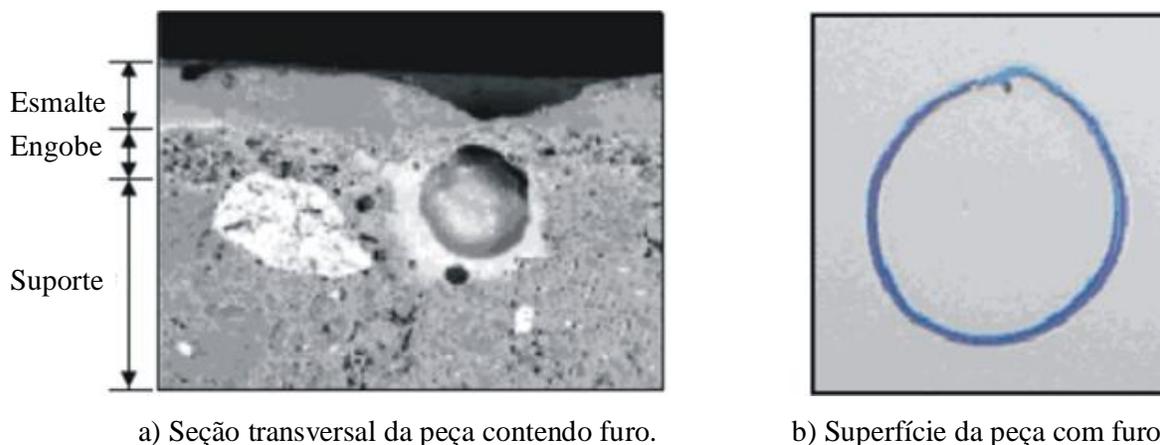


Figura 2.17: Exemplo de peças com Furo.

- **Covinha:** são pequenas depressões semi-esféricas no esmalte aplicado através de uma cortina contínua. Uma covinha pode ser originada por vários fatores. Por exemplo, quando a umidade residual da peça é elevada. Assim, um maior tempo de secagem é necessário após a aplicação do engobe/esmalte para diminuir esta umidade. Se o tempo em que a superfície da

peça apresenta-se úmida, a peça fica mais suscetível à ocorrência do defeito de covinha, pois a poeira suspensa no ambiente, ao entrar em contato com a superfície úmida da peça (que é resultado da aplicação de engobe/esmalte), pode originar o defeito de covinha. Com a variação da umidade residual devido a oscilações térmicas, as peças tendem a se tornar mais suscetíveis ao ambiente o que ocasiona maior possibilidade de presença de defeitos. A Fig. 2.18 apresenta uma peça cerâmica contendo covinha.

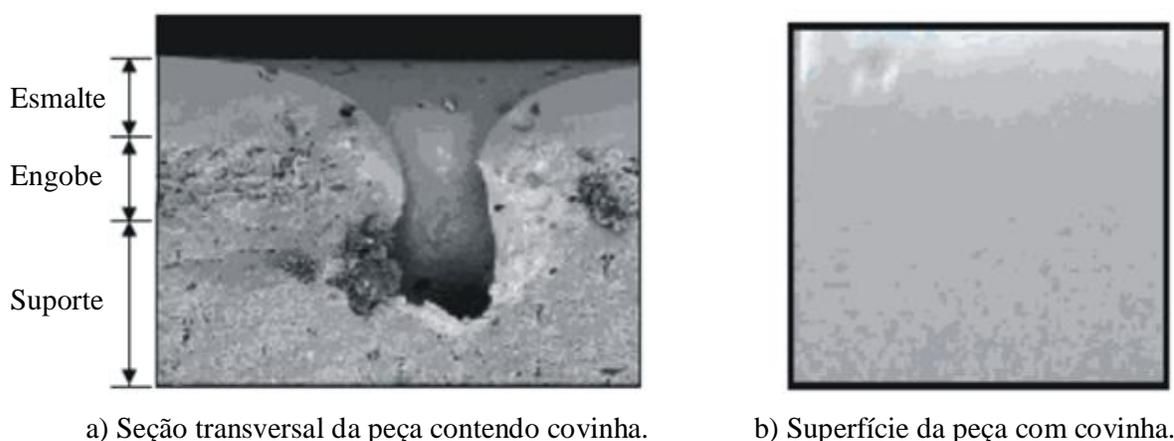


Figura 2.18: Exemplo de peças com covinha.

2.6 Caracterização do Comportamento da Temperatura no Sistema Atual de Secagem

Buscando corrigir as deficiências produtivas relacionadas a secagem de peças cerâmicas na unidade II, da Eliane Revestimentos Cerâmicos, realizou-se o monitoramento da temperatura do secador, visando através deste monitoramento conhecer o comportamento da etapa de secagem. Esta investigação ocorreu com o auxílio de um sistema de aquisição de dados *field logger*, fabricado pela empresa Com tempo de aquisição estipulado em 2,5 minutos, devido às restrições referentes ao *software*, permitindo realizar 200 aquisições.

Conclui-se com os resultados da aquisição da temperatura no secador em um intervalo de duas horas e cinquenta minutos (vide Fig 2.19), que o comportamento do mesmo não é satisfatório, apresenta-se distante das condições exigidas pelo processo para evitar defeitos relacionados a Ra, covinha e furo. Isto se deve à ocorrência de grandes oscilações de temperatura em regime produtivo ou parado. Observa-se que a resposta do secador para atingir os padrões de temperatura desejados é extremamente lenta, resultando posteriormente na quebra das peças ao longo da linha de esmaltação, devido à baixas temperaturas de secagem impostas durante esta etapa, prejudicando a qualidade final das peças cerâmicas.

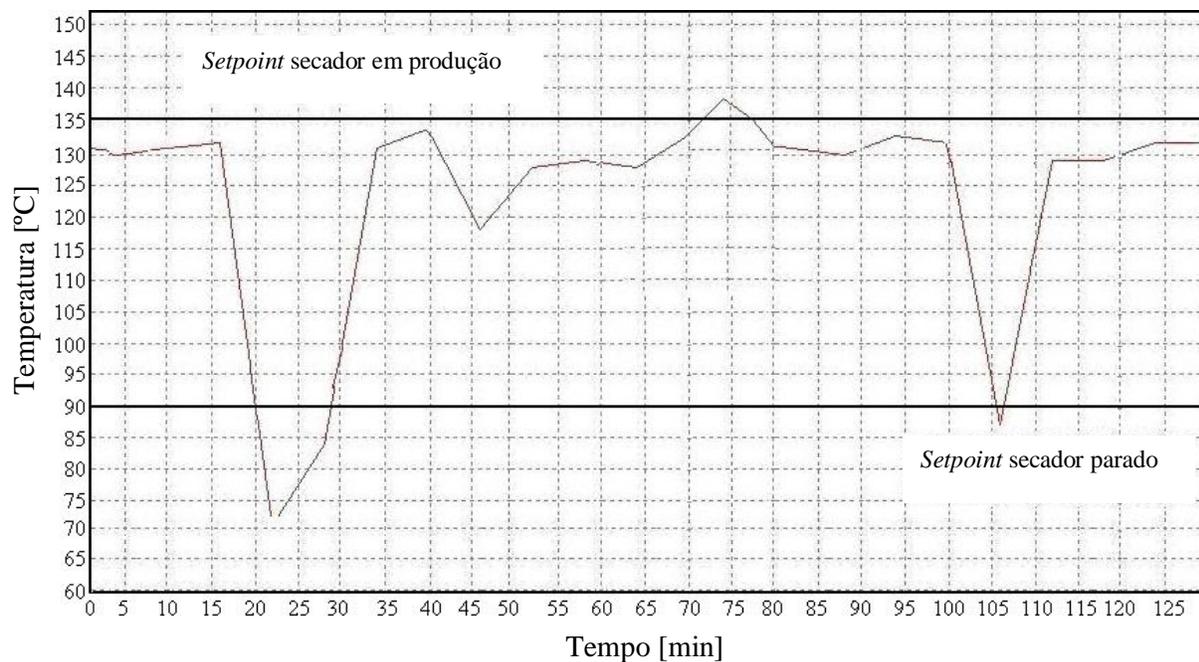


Figura 2.19: Comportamento Térmico do Secador Vertical Cerâmico.

Desta maneira, acredita-se que as perdas não se restrinjam somente a defeitos negativos sobre a qualidade final do material. Devido às oscilações de temperatura, aponta para um desperdício energético, ou seja, maior consumo de gás natural em virtude das oscilações, tendo esses efeitos impactos direto ao valor final do custo produtivo por m^2 .

Contudo para aumentar a eficiência da etapa de secagem, visando minimizar os custos, o equipamento dever operar com maior estabilidade térmica e ser dotado de um dispositivo de estequiometria para combustão do gás natural. Para corrigir os pontos mencionados acima, através da aplicação de um protótipo que garanta as condições térmicas e estequiométricas, esta ultima, deve melhorar a mistura combustível+oxidante, resultando numa redução do consumo de gás natural e defeitos estéticos mencionados. Tais resultados poderão ser observados no capítulo 6, onde serão abordadas e comparadas as respectivas variáveis mencionadas.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA COMBUSTÃO

3.1 Introdução

As crescentes inovações tecnológicas que vêm ocorrendo a partir da segunda metade do século dezoito têm intensificado a produção industrial, altamente dependente das fontes primárias de energia fóssil, ocasionando um alto nível de poluição do ar.

A queima de combustíveis fósseis gera monóxido e dióxido de carbono como subprodutos da combustão. Estes compostos entre outros são os responsáveis pela poluição, causando o aquecimento global, o efeito estufa, chuva ácida e, outras alterações climáticas. Tratados como o protocolo de Kyoto, entre outros, refletem esta busca por processos energéticos alternativos e diminuição das emissões de poluentes.

Neste capítulo são abordados os principais tópicos relacionados à combustão, que visa à ampla compreensão ampla dos fatores envolvidos em uma combustão eficaz. Os danos ao meio ambiente através da emissão de poluentes atmosféricos decorrente dos processos físico-químicos relacionados à combustão também são abordados. Posteriormente são descritas algumas das técnicas de controle aplicadas a temperatura e a combustão.

3.2 O Problema da Poluição Atmosférica

Segundo o Banco Mundial, (1998), o Brasil sofre de uma série de problemas que afetam a saúde humana, reduzem a qualidade de vida, aumentam os custos de produção e causam danos ecológicos a longo prazo. A poluição do ar por particulados finos, óxidos de enxofre, nitrogênio e monóxido de carbono, têm origem por processos de combustão e emissões de compostos voláteis no setor de transportes e nas chamadas fontes fixas, em especial as indústrias. Dentre os principais danos ao ser humano, podem-se citar as doenças respiratórias e a mortalidade prematura. Tais problemas são altamente relacionados a certos locais, afetando milhões de residentes em grandes centros urbanos e outras cidades com grandes fontes poluidoras industriais. A poluição concentrada em determinadas fontes, o caso da indústria em geral, é mais fácil de controlar do que as provenientes de fontes difusas. Considerou-se a poluição do ar com particulados a segunda maior prioridade para o Brasil, antes inclusive do tratamento de esgotos e gestão de resíduos sólidos. Atrás, somente do abastecimento de água e coleta de esgotos. Reconhece ainda que dados sobre meio ambiente sejam a base para a formulação de políticas, porém estão atualmente incompletos e dispersos entre várias entidades. Conforme o Banco

Mundial, (1998), a fiscalização efetiva pode ser melhorada mediante um enfoque estratégico de recursos limitados sobre os poluidores com o maior impacto potencial de poluição e os menores custos de controle.

A indústria consome 35% a 45% de toda a energia utilizada nos países desenvolvidos e, geralmente, uma porção maior nos países em desenvolvimento. Os setores com maior consumo de energia por unidade de produto são o de papel, químico, metais primários (particularmente o alumínio) e a própria indústria de petróleo. A indústria como um todo é responsável por aproximadamente 20% da poluição total do ar no mundo [Goldermberg, (1983)].

A sólida compreensão das origens das emissões dos poluentes é requisito importante para definição de estratégias eficientes de melhoria da qualidade do ar. O conhecimento neste campo e as habilidades para quantificar os impactos das diversas fontes de poluição aumentaram significativamente durante os anos recentes. Tal fato tem ajudado poderes decisórios em muitas partes do mundo a reverter às tendências de crescimento nas emissões, pelo menos para alguns dos poluentes tradicionais mais relevantes.

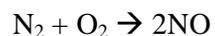
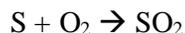
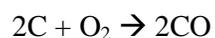
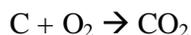
O nível de poluição atmosférica é medido pelas concentrações das substâncias poluentes presentes no ar. Os poluentes podem ser classificados da seguinte forma: primários, emitidos diretamente pelas fontes de emissão e secundários, formados na atmosfera por meio da reação química entre poluentes primários e constituintes naturais do ambiente. Quando se determina a concentração de um poluente na atmosfera, mede-se o grau de exposição dos receptores (seres humanos, ecossistemas e construções, dentre outros) a tais substâncias, considerando-se os processos físicos (como a diluição) e químicos (reações). Como regra geral, o grupo de poluentes que servem como indicadores de qualidade do ar, em razão da sua maior frequência de ocorrência e dos efeitos adversos que causam no meio, são a poeira em suspensão, dióxidos de nitrogênio, de enxofre e monóxido de carbono.

3.3 Combustão

O processo de combustão caracteriza-se por uma reação exotérmica muito rápida entre um combustível e um oxidante, que é acompanhada pela liberação de calor e luz em forma de chama. O processo começa quando o sistema atinge a temperatura de ignição (temperatura acima da qual um combustível pode queimar), prossegue espontaneamente e cessa quando é alcançado o equilíbrio entre a energia calorífica total dos reagentes e dos produtos [Carvalho e Mcquay (2007)].

3.3.1 Teoria da Combustão

As reações de combustão envolvem a oxidação completa de um combustível. Materiais ou compostos são considerados combustíveis industriais quando sua oxidação pode ser feita com a liberação de energia suficiente para o aproveitamento industrial. Os principais elementos químicos que constituem um combustível são o carbono, o hidrogênio e em alguns casos, o enxofre. As reações básicas da combustão, ou seja, as principais reações químicas envolvidas na oxidação de um combustível são [Garcia (2002)]:



As características da propagação da chama proveniente da combustão dependem substancialmente da mistura ar/combustível não queimada. A existência do movimento da chama implica em uma reação limitada a uma zona pequena em volume, A forma de propagação espacial da frente da chama resulta do equilíbrio entre a reação química, o processo de transporte de massa e o balanço entre a geração de calor e os combustíveis que aceleram a reação química, com o resfriamento dos reagentes governados pela velocidade de convecção [Heywood, (1988)].

No cenário atual, existem diversas soluções com diferentes métodos e dispositivos para o controle de temperatura de processos que possibilitam obter resultados satisfatórios. O problema do controle da combustão é fazer que a mesma possua uma relação ar/combustível adequada, pois uma variação na demanda por potência calorífica pode estar associada às variações na vazão de gás (e/ou de ar), de modo que a relação ar/combustível afaste-se das situações de melhor qualidade de combustão, em termos de emissões de poluentes e eficiência térmica.

Na combustão, o objetivo é obter a máxima geração de calor. Porém, não basta que o rendimento calorífico atenda às necessidades requeridas. Precisa-se também que isto seja feito de forma econômica. A fim de aumentar o rendimento da combustão é necessário obter o melhor aproveitamento possível do potencial energético do combustível, através de alguns fatores operacionais, como:

- Regulagem da relação ar-combustível;
- Mistura ar-combustível adequada a maior homogeneidade da mistura do combustível

com o ar aumenta a superfície de contato entre ambos e têm influência decisiva na velocidade de combustão, bem como a maior união dos elementos;

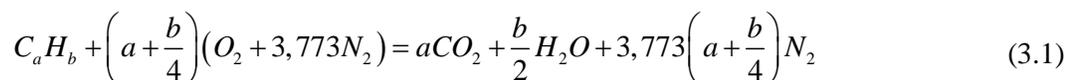
- Cálculo do ar de Combustão ao conhecer a composição do combustível e com base na estequiometria da reação, consegue-se calcular o ar necessário para a queima do mesmo;

- Equações dos cálculos Estequiométricos.

3.3.2 Razões Estequiométricas

Segundo Heywood (1988), as razões de mistura entre combustível e ar quando balanceadas quimicamente são chamadas de *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 (CO₂) e o hidrogênio em água (H₂O). Em geral, a combustão realiza-se a partir do ar atmosférico que apresenta para cada mol de oxigênio 3,773 mols de nitrogênio. Considerando o processo de combustão completo de um combustível hidrocarboneto com a composição molecular de C_aH_b, tem-se a seguinte equação:



A equação (3.1) define a proporção estequiométrica entre o ar e o combustível. Desse modo, 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 (3.1) para a obtenção da relação ar/combustível de maneira que dependa somente da composição do hidrocarboneto CH_y, assim:

$$\left(\frac{A}{C}\right)_s = \frac{\text{massa de ar}}{\text{massa de combustível}} = \frac{\left(1 + \frac{y}{4}\right)(32 + 3,773(28,16))}{12,011 + 1,008} = \frac{34,56(4 + y)}{12,011 + 1,008} \quad (3.2)$$

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 variação de ar em relação à razão estequiométrica também pode sofrer combustão. Com excesso de ar, (ou mistura pobre, como é comumente

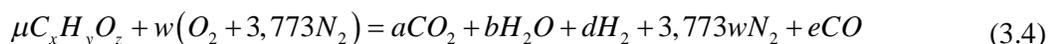
chamada) o ar extra aparece no produto na mesma forma como se apresenta no reagente. Com menos ar do que a razão estequiométrica requer (mistura rica) o oxigênio é insuficiente para a completa oxidação do combustível hidrocarboneto em CO_2 e H_2O . Neste caso, o produto é uma mistura de CO_2 e H_2O com monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H_2) e nitrogênio (N_2). Em misturas de ar/combustível um pouco pobres (próximas à razão estequiométrica) tem-se uma elevação na emissão de CO pelo fato da composição dos produtos da combustão ser significativamente diferente para misturas ricas e pobres. Pela razão estequiométrica da mistura ar/combustível depender também da composição do combustível, a razão estequiométrica real torna-se um valor que serve de referência para definir a composição da mistura em um dado instante. O parâmetro λ (*lambda*) representa a razão entre a relação ar/combustível real e ar/combustível estequiométrica. Os valores de λ podem ser obtidos pela Eq. (3.3) e variam conforme mostrado na Tabela 3.1. Utiliza-se também o parâmetro ϕ (phi), que representa o inverso de λ .

$$\lambda = \phi^{-1} = \frac{\left(\frac{A}{C}\right)_{real}}{\left(\frac{A}{C}\right)_s} \quad (3.3)$$

Tabela 3.1: Condições de λ e de ϕ para mistura pobre, rica e estequiométrica.

Mistura	λ	ϕ
Rica	<1	>1
Pobre	>1	<1
Estequiométrica	=1	=1

Quando o combustível contém oxigênio, torna-se essencial incluí-lo no balanço entre os reagentes e os produtos, resultando na equação (3.4):



Onde, μ 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)].

3.3.3 Excesso de Ar

Segundo Pinheiro e Valle (1995), para realizar a combustão em processos industriais reais é necessário uma quantidade de ar estequiométrico, também chamado de ar teórico. Entretanto, para assegurar uma combustão completa é indispensável o *excesso de ar*, para manter o teor suficiente de oxigênio até o final da chama e superar as deficiências de mistura do queimador.

O excesso de ar é definido como um percentual acima da quantidade estequiométrica de ar. Para combustíveis gasosos, geralmente se fornece um excesso de ar em torno de 1 a 2%, enquanto que combustíveis líquidos, o excesso normal utilizado encontra-se na faixa entre 5 e 10%. Para sólidos, como por exemplo, o carvão pulverizado, o excesso de ar pode chegar a 25% [Gil et al., (1987)]. Ver Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Valores usuais do coeficiente de excesso de ar.

Combustível	Tipo de Fornalha ou Queimador	Excesso de ar
Carvão Pulverizado	Aquatubular completa	1,15 - 1,20
	Aquatubular parcial fundo seco	1,15 - 1,40
Carvão Britado	Fornalha Ciclone	1,10 - 1,15
Carvão	Grelha fixa	1,30 - 1,60
	Grelha vibratória	1,30 - 1,60
	Grelha rotativa	1,15 - 1,50
		1,20 - 1,50
Óleo Combustível	Queimadores de óleo tipo registro	1,05 - 1,15
Resíduo Ácido	Queimadores chama plana a vapor	1,10 - 1,15
Gás Natural	Queimadores de óleo tipo registro	1,05 - 1,15
Gás Coqueria	Queimadores multcombustível	1,07 - 1,12
Gás Alto Forno	Queimadores de bocal intertubos	1,15 - 1,18
Madeira	Grelha	1,20 - 1,25

Na prática, sabe-se que é muito difícil obter uma boa combustão apenas com o ar estequiométrico. Utilizando-se somente o "ar teórico" há grande probabilidade do combustível não queimar totalmente (haverá formação de CO ao invés de CO₂) e, conseqüentemente, a quantidade de calor liberada será menor e as emissões de poluentes mais significativas.

A quantidade adicional de ar além do estequiométrico assegura que as moléculas do

combustível encontrem o número apropriado de moléculas de oxigênio para completar a combustão. Esse excesso precisa ser criteriosamente controlado durante o processo de combustão. Portanto, é necessário conhecer a quantidade ideal mínima do excesso de ar a ser introduzida na queima, pois o ar que não participa da combustão tende a esfriar a chama sem contribuir para a reação. Quanto maior o excesso, maior o volume de gases nos produtos de combustão e, conseqüentemente, maior a perda de calor pelas chaminés, o que influi negativamente na eficiência da combustão. Contudo, como as perdas por excesso de ar aumentam em proporção muito menor que as perdas com combustível não queimado nos processos de combustão industrial sempre se procura trabalhar com excesso de ar.

Conforme Pinheiro e Valle (1995), a relação ar/combustível pode ser expressa através da Eq. (3.5), para obtenção do coeficiente do excesso de ar (α), que consiste na razão entre a quantidade total de ar utilizado na combustão (V_{ar}) e a quantidade de ar estequiométrico (V_{est}).

$$\alpha = V_{ar} / V_{est} \quad (3.5)$$

O valor de α pode ser calculado através da Eq. (3.6), a partir da análise da decomposição volumétrica percentual dos produtos da combustão:

$$\alpha = \%CO_2 \text{ estequiométrico} / \%CO_2 \quad (3.6)$$

O excesso de ar é um fator determinante da eficiência da combustão, pois controla o volume, temperatura e entalpia dos produtos da combustão. A Eq. (3.7) expressa a relação das perdas de calor devido à entalpia dos gases efluentes (Q_2) e o excesso de ar, considerado indesejável, pois um grande excesso diminui a temperatura, o comprimento da chama e ocasiona a redução da eficiência térmica. Contudo, como já visto, um baixo excesso de ar pode resultar em uma combustão incompleta com formação de CO, fuligem e fumaça, além de possibilitar a acumulação de combustível não queimado, facilitando o risco de explosão.

$$Q_2 = V_g C_{p_g} T_g - V_{est} C_{p_{ar}} T_{ar} \quad (3.7)$$

Na Eq. (3.7), Q_2 representa a perda de calor devido à entalpia dos gases efluentes, V_g é o volume de gases de combustão (m^3 / Kg CNTP), C_{p_g} é o calor específico dos gases de combustão (kJ/kg K), T_g representa a temperatura de saída dos gases de combustão (Temperatura Adiabática de Chama)(K), V_{est} é o volume de ar estequiométrico (m^3 / Kg CNTP), $C_{p_{ar}}$ é o calor específico do ar de combustão (kJ/kg K) e T_{ar} é a temperatura de entrada do ar de combustão (K).

O valor ótimo do excesso de ar é aquele em que a taxa de ar é suficientemente baixa para evitar a perda de calor (Q_2) e suficientemente alta para produzir uma combustão completa.

Assim, o valor ótimo depende da eficiência da combustão aceitável e dos limites de poluição impostos para NOx e CO, obtido experimentalmente pela análise dos produtos da combustão durante o ajuste do equipamento da combustão [Pinheiro e Valle (1995)].

3.3.4 Eficiência da Combustão

A eficiência da combustão permite calcular a temperatura de chama através de um balanço de energia, dada pela equação

$$\eta_c = (Q_{\text{disp}} - Q_2 - Q_3) / Q_{\text{disp}} \quad (3.8)$$

Onde Q_{disp} representa a energia disponível para a combustão e, V_{gs} é o volume dos produtos da combustão secos ($\text{m}^3 / \text{Kg CNTP}$).

As perdas de calor devido à combustão incompleta (Q_3), cuja mistura ar/combustível não proporcionou a queima completa do combustível, é descrita pela equação abaixo:

$$Q_3 = 126,4V_{\text{gs}} \% \text{ CO} \quad (3.9)$$

O desperdício de calor pela formação de H_2 e CH_4 é normalmente insignificante e desprezada. Na combustão de sólidos, a perda de calor ocasionado pelo combustível não queimado é significativa e deve ser considerada. A eficiência máxima é obtida pela minimização da soma de Q_2 e Q_3 (veja a Fig. 3.1). Estas perdas de energia resultam da temperatura dos produtos da combustão e do excesso de ar na fornalha. Visto que as emissões são componentes dos produtos da combustão, a análise completa e a temperatura dos produtos fazem-se necessária para determinar a eficiência da mesma e os níveis de emissão [Pinheiro e Valle (1995)].

Geralmente, a eficiência da combustão depende mais do método operacional do que dos queimadores e equipamentos auxiliares. De fato, o rendimento do processo de combustão esta intimamente ligada à precisão de ajuste do excesso de ar de combustão.

Segundo Pinheiro e Valle (1995), a dificuldade da análise e do controle do processo de combustão real deve-se ao fato de que o coeficiente de excesso de ar afeta a eficiência e os níveis de emissão de maneiras diferentes e antagônicas. O efeito do coeficiente de excesso de ar será examinado a seguir em quatro faixas. As figuras 3.1 e 3.2 representam valores típicos de eficiência e níveis de emissões.

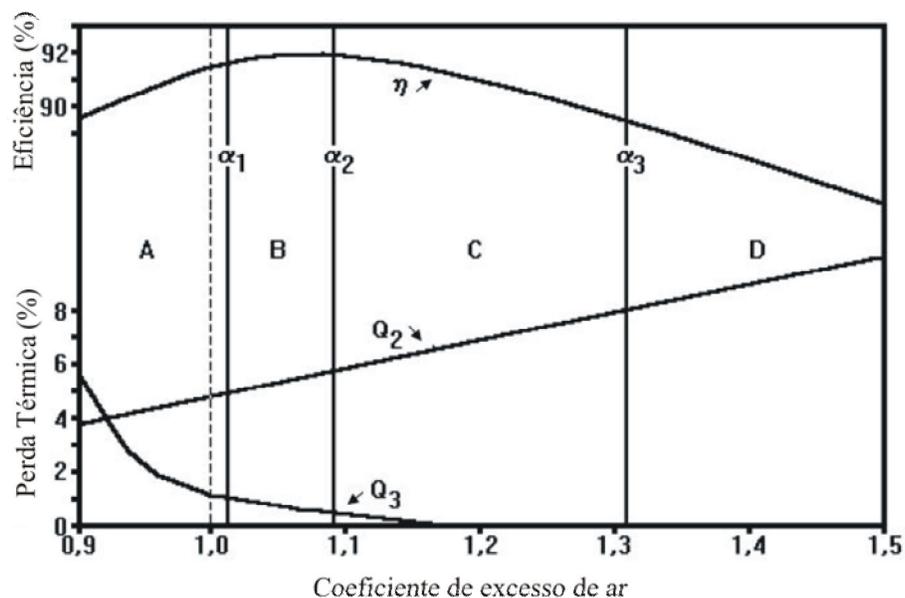


Figura 3.1: Balanço térmico da combustão. Fonte Pinheiro e Valle (1995).

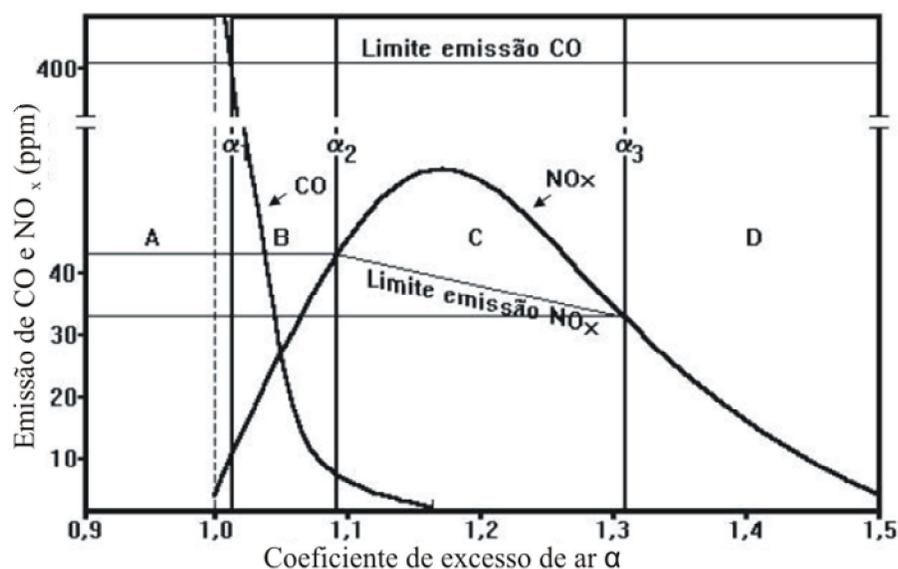


Figura 3.2: Emissão de poluentes na combustão. Fonte Pinheiro e Valle (1995).

A combustão com excesso de ar inferior a α_1 (faixa A) não é aceitável, pois o teor de CO nos produtos da combustão excede os limites geralmente aceitáveis. Com um excesso de ar entre α_1 e α_2 (faixa B), tem-se uma combustão quase completa e um baixo α . Esta faixa é ideal (devido às baixas emissões de CO, NO_x e à alta eficiência da combustão). Entretanto, para operar na faixa B, torna-se necessário ajustar os queimadores ou modificar radicalmente o processo de combustão. Na maioria das instalações, a faixa B só pode ser realizada com combustão sub-estequiométrica ou com recirculação de gases.

Na faixa C, os níveis de emissão de NO_x excedem os limites da norma, e a operação é possível com equipamentos de tratamento de gases efluentes. A eficiência da combustão torna-se inferior à faixa B, porém, aceitável. Na faixa D, os níveis de emissões de CO e NO_x encontram-se dentro dos limites, mas a eficiência térmica é baixa.

Assim, pela análise da Fig 3.2, verifica-se que a operação deve, quando possível, ser realizada nas faixas B e C. Entretanto, para operar nessas faixas é necessário muitas vezes, implementar modificações no processo ou instalar equipamentos de pós-combustão dos produtos. O balanço econômico (investimento/operação) vai determinar qual a instalação mais adequada de equipamentos, ou mesmo, determinar uma operação fora da região de eficiência ótima (faixa D). Certos sistemas de combustão comportam-se de modo diferente e algumas das faixas citadas podem não existir.

3.3.5 O Controle do Excesso de Ar

O controle de combustão (razão ar/combustível) não pode ser realizado através do controle da vazão de combustível, pois a energia gerada pelo queimador depende da quantidade de combustível introduzido. Assim, é adequado regular a vazão de ar e combustível.

Tradicionalmente, a vazão de ar é regulada por um sistema de controle em malha aberta. Este controle é realizado em função da vazão de combustível, acionando-se diretamente a válvula do ar ou de controle da vazão do ar. O controle em malha aberta estabelece uma relação ar/combustível insatisfatória em muitos casos, conforme apresentado na Tabela 3.1. Demandas de carga variáveis e queima de combustíveis alternados, comuns nos processos industriais, modificam a relação ar/combustíveis ótima. A temperatura do ar variável requer reajustes freqüentes, tornando impraticável este controle. Assim, para assegurar uma combustão completa, mesmo nas piores condições operacionais é necessário um grande excesso de ar (20 a 30%).

Conforme Pinheiro e Valle (1995), para otimizar o excesso de ar é necessário realizar um controle de combustão mais preciso que pode ser obtido através de um sistema de controle em malha fechada. Realiza-se isto a partir da análise do CO_2 , O_2 e CO nos produtos da combustão na saída da chaminé (vide Fig. 3.3).

O controle do excesso de ar pode ser executado a partir da análise do teor de CO_2 (Eq. 3.6). Sua desvantagem é que o *set-point* precisa ser ajustado para cada combustível e o sensor de CO_2 apresenta um valor muito alto em relação ao de O_2 . No caso de medidas descontínuas e manuais realizadas por analisadores químicos, seu uso não é recomendado.

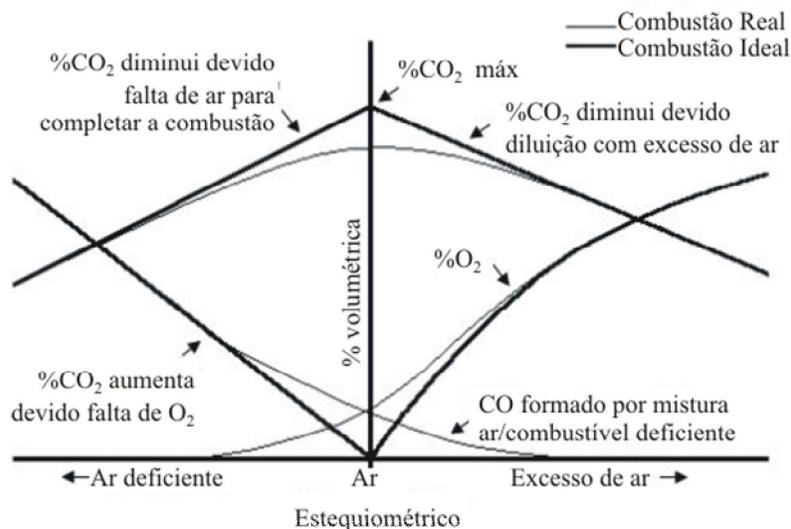


Figura 3.3: Produtos da combustão. Fonte Pinheiro e Valle (1995).

Analísadores de O_2 têm sido muito usados no controle da combustão, pois são de baixo custo, possuem baixo tempo de resposta, pouca manutenção e medem diretamente o excesso de ar na chaminé. A principal desvantagem é que o *set-point* precisa ser ajustado para cada combustível e taxa de combustão, já que o valor medido não depende unicamente da estequiometria da reação. O O_2 presente nos produtos pode ser devido a queimadores inativos, portinholas abertas, infiltrações, etc. Dessa maneira, a infiltração de ar na fornalha pode inviabilizar o controle baseado na medição de O_2 .

Contudo, o controle baseado na medição de CO tem a vantagem de o valor do *set-point* ser independente do tipo de combustível e da carga do sistema. A formação do CO deve-se a uma quantidade de ar local insuficiente para completar a combustão. Se a combustão é completa, o nível de CO tende a zero, visto que a mistura ar/combustível perfeita não é realizável.

Para aplicações de controle baseado em emissões de CO, o analisador precisa medir até 1000ppm para detectar os transientes. Isto elimina a necessidade de ajuste do valor do *set-point* em função das condições operacionais. Além disso, como o teor de CO nos gases é pequeno, infiltrações ou registros mal regulados não interferem nos valores medidos, uma vez que a diluição é pequena. Outra vantagem consiste no fato de o CO ser um produto intermediário da combustão. Assim, a presença de CO consiste de uma relação direta com o desenvolvimento da reação de combustão no fim da chama, o que causa a emissão de particulados.

3.3.6 Avaliação do Rendimento da Combustão

Segundo Bazzo (1992), se a composição do combustível e dos produtos de sua

combustão são conhecidos o rendimento da combustão pode ser calculado. Assim, de acordo com esta metodologia, a quantidade teórica de ar para uma combustão completa e a composição estequiométrica dos produtos combustíveis devem ser calculados e comparados com a composição real, obtida pela análise dos gases de combustão. Com isso, podem-se ter as seguintes situações:

- A quantidade de calor é desperdiçada no aquecimento de quantidades excessivas de gases de combustão; isto quer dizer que está sendo usado mais ar que o necessário, (na prática um pequeno excesso sobre o ar estequiométrico é necessário para assegurar uma completa combustão);
- Uma parte do combustível está escapando da região de combustão sem estar completamente queimado. Este fato é demonstrado pela presença de CO e fuligem do combustível não queimado.

A análise dos gases de combustão ou dos gases perdidos nos processos é comumente relatada em base seca de volume, isto é, sem referência à umidade presente no gás. O valor do estudo do gás de combustão reside na informação que a mesma é capaz de proporcionar e na sua interpretação. Um combustível específico requer uma quantidade própria de ar para a completa combustão teórica. Sabe-se que é necessária uma quantidade adicional para atingir na prática a combustão completa. Abaixo desta quantidade prática, que é uma função do tipo de combustível, do rendimento do queimador e das condições de combustão, é desperdiçado combustível. Esta condição pode ser reconhecida pelo aparecimento de quantidades excessivas de monóxido de carbono no gás de combustão, um pouco aquém da produção da fumaça preta (fuligem). Acima desta quantidade, perde-se energia calorífica que sai junto a quantidades excessivas de gás de combustão. Isto é reconhecido pela grande quantidade de oxigênio no gás de combustão. A aplicação do bom senso ao interpretar a análise do gás de combustão pode levar, por exemplo, à descoberta de deficiências no processo.

3.4 Limites de Inflamabilidade

Se um dado conjunto de condições permite a propagação de uma chama estável e se as condições são progressivamente alteradas até um estado em que uma chama estável não se propaga mais, este estado denomina-se basicamente de um “limite de estabilidade”. Nesta situação vários comportamentos diferentes podem ocorrer. Por exemplo, se a chama não se propaga, denomina-se *limite de inflamabilidade* [Carvalho e Mcquay (2007)].

A relação entre o combustível e o oxidante em uma mistura determina se a mesma é ou

não inflamável. O interesse industrial no assunto ocorre tanto no aspecto de operação como no de segurança.

3.4.1 Limites Inferior e Superior de Inflamabilidade

Segundo Garcia (2002), a menor concentração de gás ou de vapor combustível em ar ou em oxigênio 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”.

Uma mistura somente queima se a concentração do combustível está entre os limites inferior e superior de inflamabilidade, denominados de LI e LS, respectivamente. A medida dos limites de inflamabilidade envolve experimentos repetidos com diferentes valores de variáveis como razão combustível/oxidante, porcentagem de diluentes, temperatura e pressão iniciais.

Um gás ou um vapor combustível misturado com ar ou oxigênio não entra em combustão quando 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 mais comburente estiver dentro da faixa delimitada pelos dois limites citados.

Uma vez que a inflamabilidade tende a ser fortemente afetada pelas condições do experimento, é preciso cuidar para que tais condições não interfiram nos resultados. Existem testes-padrão para os quais a temperatura e pressão iniciais são 25°C e 1 atm, respectivamente. Na tabela 3.3 estão relacionados os limites de inflamabilidade de alguns combustíveis no ar, considerando o ar como 21% de O₂ e 79% de N₂.

Tabela 3.3: Limites de inflamabilidade de alguns combustíveis no ar. Fonte Glassman, (1996).

Combustível	Fórmula	LI (%)	LS(%)	PE (%)
Hidrogênio	H ₂	4	74,2	29,6
Monóxido de carbono	CO	12,5	74,2	29,6
Metano	CH ₄	5	15	9,5
Etano	C ₂ H ₆	3	12,4	5,7
Etileno	C ₂ H ₄	3,1	32	6,5
Acetileno	C ₂ H ₂	2,5	80	7,8
Propano	C ₃ H ₈	2,1	9,5	4,0

Uma regra prática para estimar os limites de inflamabilidade é que o limite superior seja considerado cerca de três vezes o valor estequiométrico e o limite inferior aproximadamente 50% do valor estequiométrico [Glassman, (1996)]. Esta regra, no entanto, tem inúmeras exceções, conforme mostra a Tabela 3.3.

O amplo intervalo de inflamabilidade do hidrogênio indica que é fácil obter uma mistura inflamável deste gás/ar. Para o metano e propano, o intervalo de inflamabilidade é estreito e pode ocorrer um longo período de tempo até que a fonte de ignição consiga iniciar a combustão da mistura.

Conforme mostrado na Fig. 3.4, o intervalo de inflamabilidade alarga-se quando a temperatura inicial da mistura aumenta. Mudanças na pressão inicial da mistura não alteram o LI para hidrocarbonetos no ar, porém o LS aumenta com a pressão.

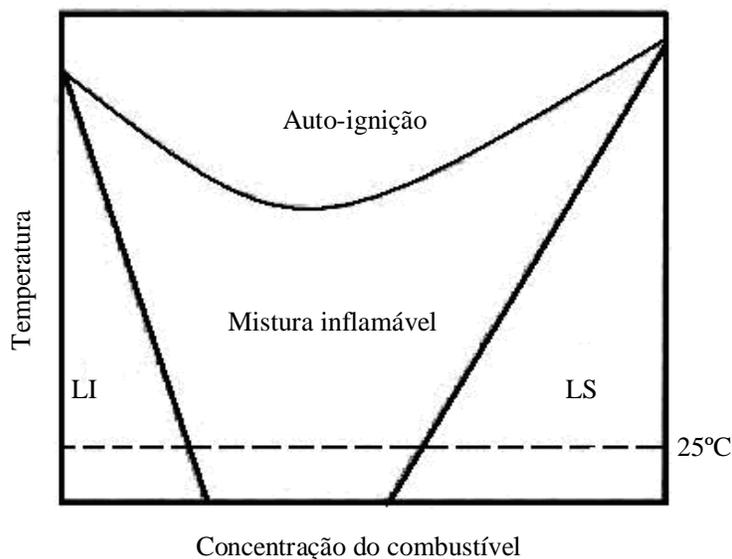


Figura 3.4: Efeito da temperatura nos limites de inflamabilidade. Fonte Carvalho e Mcquay (2007).

A temperatura de ignição é aquela em que uma pequena porção da mistura, a uma determinada temperatura inicial e pressão, precisa ser submetida para a combustão propagar-se na própria mistura. A temperatura de ignição é mínima para a mistura estequiométrica.

O limite inferior é o mesmo em oxigênio e no ar. Contudo, o limite superior é muito maior em oxigênio que no ar. Isto ocorre porque o limite inferior está na região de excesso de oxidante e a troca de nitrogênio por oxigênio não afeta parâmetros importantes, como por exemplo temperatura de chama. Na Tabela 3.4, estão listados limites de inflamabilidade no ar e em oxigênio.

Tabela 3.4: Comparação de limites de inflamabilidade no ar e em oxigênio. Fonte Glassman, (1996).

Combustível	LI (%)		LS (%)	
	Ar	O ₂	Ar	O ₂
Hidrogênio	4	4	74	94
Monóxido de carbono	12	16	74	94
Amônia	15	15	28	79
Metano	5	5	15	61
Propano	2	2	10	55

3.4.2 Misturas com Diferentes Diluentes

Segundo Carvalho e Mcquay (2007), para misturas de metano e ar com diferentes diluentes, obtava-se a 25°C e 1 atm, os resultados ilustrados na Fig. 3.4, a partir dos quais pode-se concluir que:

- Os pontos A e B no eixo vertical são os limites rico e pobre de metano no ar, respectivamente;
- A adição de diluentes estreita a faixa dos limites e, a partir de certo valor impede a propagação;
- Diferentes gases diluentes produzem variados efeitos, com a efetividade dependendo do calor específico. Isto sugere que a natureza do efeito é relacionada com maior ou menor temperatura de chama adiabática. A temperatura de chama adiabática é a maior que se pode atingir a partir de uma mistura de determinada proporção entre combustíveis e o oxidante. Ela ocorre quando não há perdas de energia para fora do recipiente onde se realiza o processo de combustão;
- A diluição com N₂ praticamente não afeta o limite pobre (inferior), pois o calor específico do N₂ é aproximadamente igual ao do O₂, e a redução da concentração de O₂ tem pouco efeito onde há excesso do mesmo;
- A diluição por He na realidade melhora a combustão em volta do limite inferior, por causa de um aumento na combustão térmica;
- Os efeitos de tetracloreto de carbono e de brometos metálicos são provavelmente causados pela quebra de cadeia.

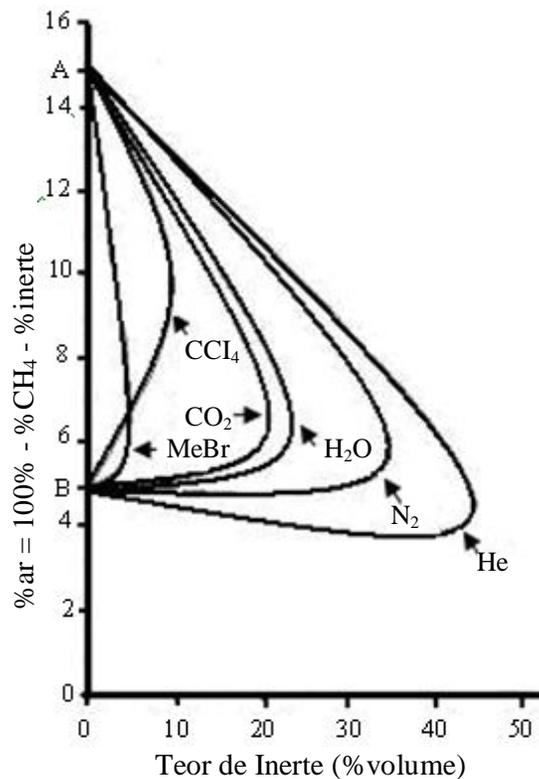


Figura 3.5: Limites de inflamabilidade de várias misturas metano/ar/gás inerte. Fonte Carvalho e Mcquay (2007).

3.5 Gás Natural

3.5.1 Introdução

O gás natural tem aumentado significativamente a sua participação no balanço energético nacional, devido à distribuição do gás da Bacia de Campos e provindo da Bolívia. Muitas indústrias servidas por gasodutos estão convertendo seus processos para a utilização do gás natural em substituição ao GLP (gás liquefeito de petróleo) e óleo combustível.

O processo de fabricação de revestimentos cerâmicos, em algumas de suas etapas, exige um alto consumo energético, responsável pelas transformações físico-químicas necessárias para a obtenção do produto final. O consumo de energia térmica no processo de fabricação exerce grande influência sobre o custo do produto final.

Apresenta-se nessa seção uma análise do uso do gás natural em sistemas de aquecimento, mostrando os resultados do uso de gás natural em processos industriais e análise das estratégias de combustão do mesmo.

3.5.2 Características do Gás Natural

O gás natural é formado principalmente de compostos pertencentes à família das parafinas normais (metano CH_4 , etano C_2H_6 , propano C_3H_8 e butano C_4H_{10}), hidrocarbonetos mais pesados e, também, dióxido de carbono, nitrogênio, água, ácido clorídrico, metanol e impurezas mecânicas. Os átomos de carbono estão interligados em seqüência com átomos de hidrogênio, que preenchem as ligações vazias. A fórmula geral para esta cadeia é expressa por $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$, a qual não deve ser confundida com a do metano.

Conforme sua origem, o teor de metano pode variar de cerca de 70% até 97%. O segundo componente em maior quantidade é o etano (aproximadamente 6,5%). Em terceiro vem o nitrogênio que dependendo da temperatura é inerte (aproximadamente 1,4%). Os demais componentes estão presentes em quantidades pouco significativas. Portanto, a fórmula química equivalente reduzida do gás natural é $\text{CH}_{3,76}$ (a do metano é CH_4).

Segundo Pinheiro e Valle (1995), quanto à extração do GN, o mesmo é classificado como:

- Gás natural associado: encontra-se dissolvido no petróleo cru e/ou forma uma camada protetora gasosa sobre ele (gás livre). O aumento na profundidade do reservatório ocasiona uma elevação na quantidade de gás em relação ao petróleo. No Brasil, em torno de 65% das reservas e 85% de sua produção é de gás associado;
- Gás natural não associado: localiza-se em depósitos subterrâneos, não acompanhados de hidrocarbonetos em fase líquida.

O gás natural e o petróleo são originários principalmente da maturação térmica da matéria orgânica contida nas rochas. As características do combustível formado vão depender do tipo de matéria orgânica predominante e da história térmica da bacia. As rochas geradoras são continuamente soterradas pela deposição de novos sedimentos, submetidas a uma elevação constante de temperatura e pressão, deste modo formam-se os hidrocarbonetos.

Sua composição apresenta um elevado índice de metano e etano, que atinge em conjunto 97% da massa total, com baixo percentual de gases inertes, portanto, é considerado um gás de alto poder calorífico. A Tabela 3.5 demonstra a composição do gás.

Tabela 3.5: Composição do Gás Natural Boliviano. Fonte Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos, (2000).

Componente	Fórmula	% Molar
Metano	CH ₄	91,8
Etano	C ₂ H ₆	5,58
Propano	C ₃ H ₈	0,97
I - Butano	C ₄ H ₁₀	0,03
N - Butano	C ₄ H ₁₀	0,02
Pentano	C ₅ H ₁₂	0,1
Nitrogênio	N ₂	1,42
Gás Carbônico	CO ₂	0,08

Na Tabela 3.6, estão descritas as principais características físico-químicas do gás natural, fornecido ao parque industrial do grupo Eliane, onde se utiliza como combustível do secador vertical EVA 140.

Tabela 3.6: Características físico-químicas do gás natural (20° C, 1 atm).

Poder Calorífico Superior	9400 Kcal/m ³
Poder Calorífico Inferior	8450 Kcal/m ³
Densidade Relativa (ar)	0,601
Índice Wobbe (PCS)	11939
Peso Molecular	17,41 g/mol
Número Weaver	16,6
Fator Compressibilidade	0,998

3.5.3 Utilização de Gás Natural em Equipamentos Térmicos

Em um equipamento térmico, operando com qualquer combustível, objetiva-se atender os seguintes requisitos:

- Baixo custo operacional;
- Combustão completa com segurança e operacionalidade;
- Máxima eficiência térmica (transmissão de calor otimizada);
- Níveis de emissões de poluentes (SO₂, CO, NO_x, hidrocarbonetos e particulados)

dentro dos níveis regulamentados.

As características do gás natural tornam-se uma alternativa viável em relação aos demais combustíveis, devido às seguintes vantagens:

- Encontra-se pronto para o consumo, não sendo necessárias manipulações ou preparação antes da combustão;
- Mistura-se facilmente com o ar, obtendo um contato efetivo entre o combustível e o ar, assim, reduz o excesso de ar necessário para assegurar a combustão completa. É fácil o controle da atmosfera da fornalha e, a obtenção de uma chama longa de combustão lenta com liberação gradual e uniforme da energia;
- O gás natural desloca-se e pode ser manipulado com facilidade. Basta uma válvula para regular com precisão as vazões de ar e gás. Podem-se obter variações rápidas e grandes da vazão, mantendo constante a relação da mistura;
- Seus produtos de combustão têm baixos níveis de poluição, quando comparados aos outros combustíveis. O teor de enxofre é muito inferior ao do carvão e dos óleos combustíveis. Não origina depósitos de resíduos que contaminam a produção ou afetam a eficiência do equipamento e/ou instalações. Isto simplifica e diminui os custos de operação e manutenção;
- Em estado gasoso, permite utilizar várias configurações e tipos de queimadores, além de apresentar grande flexibilidade no seu funcionamento. A eficiência dos sistemas de combustão a base de GN é, em geral, maior, pois permite maior flexibilidade de regulação e controle dos equipamentos [Pinheiro e Valle (1995)].

Entre as desvantagens do gás natural pode-se citar:

- A densidade é muito menor que a dos combustíveis sólidos e líquidos. Isto resulta em dificuldades de armazenamento e de transporte.
- Devido ao alto teor de hidrocarbonetos leves, os produtos de sua combustão possuem grande quantidade de vapor d'água. Assim, o calor específico dos produtos é alto, as temperaturas de combustão são mais baixas e existem os problemas em virtude da condensação do vapor.
- A quantidade (massa) de combustível dentro da fornalha é geralmente muito pequena. Isto torna a combustão sensível à variação de consumo de ar e combustível, e permite em caso de necessidade modificar a carga da fornalha instantaneamente. Ao mesmo tempo torna-se crítico o controle da combustão, pois uma interrupção da alimentação provocará a extinção da chama, que está vinculado ao perigo de explosão ao recomeçar a alimentação.

Na indústria, o GN pode ser utilizado em caldeiras, em substituição ao óleo combustível para gerar vapor ou aquecer fluido térmico. Aplica-se GN no aquecimento de indústrias de alimentos, papel, celulose, têxtil, revestimentos cerâmicos, acionamento de ventiladores,

bombas, compressores e geração de eletricidade. Pode ser utilizado em substituição ao GLP em oxicorte. O uso em fornos industriais é amplo, sobretudo, devido à ausência de cinzas e ao baixo teor de enxofre, que poderiam contaminar o produto.

3.5.4 Transmissão de Calor nas Chamas de Gás Natural

O Calor transmitido por radiação (Q_r) em uma fornalha totalmente fechada por superfícies receptoras de calor T_p pode ser expressa por:

$$Q_r = \sigma_o A_p \epsilon_f (T_{ch}^A - T_p^A) \quad (3.10)$$

Onde σ_o é a constante de Stefan-Boltzmann, ϵ_f é a emissividade da fornalha (sistema chama superfície receptora de calor), T_{ch} é a temperatura da chama (K) e A_p é a superfície das paredes. A temperatura das paredes devido à incrustação de escória e deposição de cinzas deve ser calculada levando-se em consideração o fluxo térmico e a resistência térmica da camada incrustada. A emissividade da fornalha é dada por [Pinheiro e Valle (1995)]:

$$\epsilon_f = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_c} + \frac{1}{\epsilon_p} - 1} = \frac{\epsilon_c \epsilon_p}{\epsilon_c + \epsilon_p - \epsilon_c \epsilon_p} \quad (3.11)$$

Onde o ϵ_p é a emissividade das superfícies e ϵ_c é a emissividade efetiva da combustão, a qual pode ser expressa por:

$$\epsilon_c = \eta \epsilon_{ch} + (1 - \eta) \epsilon_g \quad (3.12)$$

Onde η representa a fração da câmara ocupada pela chama, para o gás natural ($\eta = 0,1$), ϵ_{ch} é a emissividade da chama luminosa e ϵ_g é a emissividade dos produtos da combustão.

A emissividade da chama deve-se ao lançamento de gases tri-atômicos (CO_2 e H_2O), das partículas de fuligem, de combustível incandescente e das cinzas. Em uma mesma temperatura, as substâncias gasosas possuem uma emissividade muito menor que as sólidas. Em queimadores de pré mistura a chama do gás natural apresenta pouca luminosidade. A radiação emitida por esta chama é devido, principalmente, aos gases tri-atômicos presentes na fornalha.

Conforme Pinheiro e Valle (1995), a emissividade de qualquer meio gasoso é calculada pela lei de Bouguer:

$$\epsilon_{ch} = 1 - \exp[-(K_g + K_s)P S_{ef}] \quad (3.13)$$

$$\epsilon_g = 1 - \exp(-K_g P S_{ef}) \quad (3.14)$$

Onde S_{ef} é o comprimento efetivo do meio semi-transparente, P é a pressão total dos gases dentro da fornalha (atm), K_g é o coeficiente de atenuação da radiação pelo meio semi-transparente e K_s é o coeficiente de atenuação ocasionada pelas partículas de fuligem, K_g e K_s podem ser calculados, respectivamente, por:

$$K_g = \left[\frac{0,78 + 1,6R_{H_2O}}{\sqrt{P} S_{ef} (R_{H_2O} + R_{CO_2})} \right] \left[1 - 0,37 \frac{T_{gs}}{1000} \right] (R_{H_2O} + R_{CO_2}) \quad (3.15)$$

$$K_s = 0,03(2 - \alpha)(0,0016T_f - 0,5)(CH_2) \quad (3.16)$$

A análise dos processos de transmissão de calor e de combustão do gás natural em fornalhas é dificultada pelo grande número de variáveis envolvidas, assim, fica difícil de identificar a influência de cada variável no contexto geral. A Fig. 3.5 mostra o rendimento térmico de uma fornalha com a utilização do óleo combustível BPF, gás natural, e diversos combustíveis alternativos.

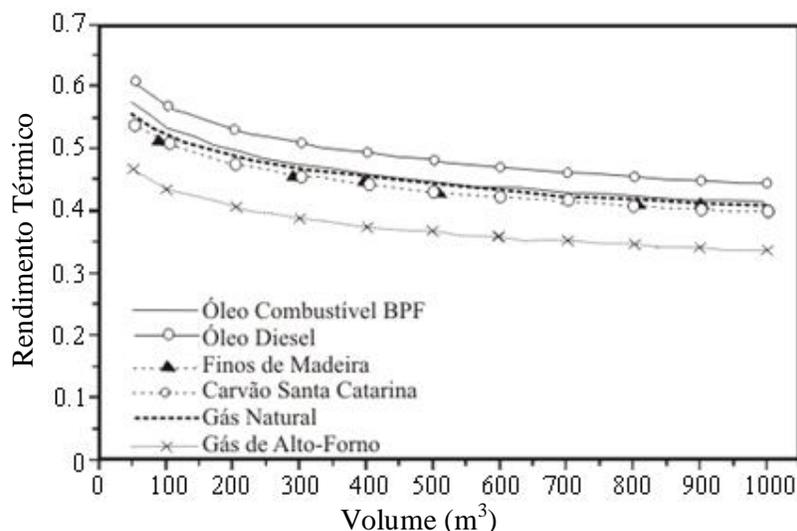


Figura 3.6: Rendimento térmico da fornalha. Fonte Pinheiro e Valle (1995).

Na combustão do gás natural, a menor deposição de fuligem sobre as superfícies da fornalha proporciona uma maior transmissão de calor. Além disso, a grande velocidade de combustão permite a ocorrência de grandes taxas de liberação de energia no volume da fornalha (até 350kW/m³), sem que a chama atinja o duto de saída. Assim, a utilização do gás natural ou mesmo do gás de coqueria e do gás de refinaria (não representados na figura), permite obter até mesmo uma maior produção térmica do que com o óleo combustível [Davies e Oeppen, (1972)].

3.5.5 Poluição Relacionada à Utilização do Gás Natural

A combustão dos hidrocarbonetos produz essencialmente CO_2 e H_2O . Esses produtos não são considerados poluentes no funcionamento normal de instalações térmicas utilizando combustíveis fósseis. Entretanto, além desses produtos, são produzidos o monóxido de carbono (CO), óxidos de enxofre (SOx) e nitrogênio (NOx), que são poluentes. A tabela 3.7, apresenta a taxa de emissão de poluentes na queima de diversos combustíveis. Observa-se que o GN é significativamente menos poluente que o óleo combustível e o carvão, assim, tornam as plantas a GN mais fáceis de contextualizar, regulamentar e operar dentro das normas ambientais. Contudo, em muitos gasodutos são utilizados compressores acionados por turbinas a gás, onde geralmente não é controlada a emissão de NOx e CO ou fugas de gás.

Tabela 3.7: Emissões de poluentes dos combustíveis industriais (kg/tep, kg/107cal)

Combustível	Gás Natural 7550 Kcal/m ³	Óleo BTE 10000 Kcal/kg 1% enxofre	Carvão 7000 Kcal/kg 1% enxofre
Poluente			
CO	0,3	0,7	1,5
Nox	2,3-4,3	8,2	1,5
Sox	0,007	20	29,2
CnHn	-	0,4	1,5
Aldeídos	-	0,28	0,004
Particulados	0,1-0,3	1,8	100

Os óxidos de enxofre são formados pela oxidação do enxofre presente no combustível. Como os teores de enxofre são extremamente baixos no gás natural, as emissões de SO_2 e SO_3 nessas instalações são geralmente consideradas nulas.

Os óxidos de nitrogênio (NOx) podem ser formados de dois modos distintos:

- Conversão do N quimicamente ligado no combustível (NOx combustível);
- Oxidação do N_2 do ar de combustão (NOx térmico).

A taxa de emissão de NOx combustível é, sobretudo, uma função do teor de nitrogênio no combustível. A taxa de emissão do NOx térmico está em função da temperatura da chama, da quantidade de excesso de ar e do tempo de residência dos gases dentro da chama.

Diferentes técnicas podem ser utilizadas para diminuir a emissão de NOx nas instalações utilizando o gás natural: filtragem, precipitação eletrostática, lavagem de gases, injeção de

diluyente, redução catalítica (SCR), controle e modificação na combustão. Dentre estas, as técnicas de controle da combustão, onde a formação de NOx é limitada na chama, há a possibilidade de grande redução da emissão de NOx a um baixo custo e, são facilmente implementadas quando utilizam a combustão do gás natural. As principais técnicas são:

- Combustão com baixo excesso de ar: é uma combustão de gás que permite uma boa homogeneização da mistura ar/combustível, viabilizando a operação de uma taxa de excesso de ar muito baixa. Isso diminui as emissões de NOx devido à redução do teor de oxigênio livre dentro da chama, ao mesmo tempo que permite um grande rendimento térmico [Queiroz, (1988)];

- Combustão com alto excesso de ar: utilizada em certos processos industriais, que é necessário um grande volume de ar de diluição. Assim, a combustão pode ser efetuada com grande excesso de ar (<100%), o que diminui a temperatura da chama e as taxas de NOx [Queiroz, (1988)];

- Recirculação de gases: esta técnica consiste de recircular uma parte dos produtos da combustão no ar de combustão. Também pode ser utilizado a injeção de vapor d'água. Esta técnica permite uma redução de cerca de 50% das taxas de emissão de NOx, contudo, pode criar instabilidade de chama;

- Combustão em multiestágios: a combustão é realizada escalonando a entrada de combustível e a entrada de ar. Por esse método, as taxas de NOx podem diminuir cerca de 60% em relação à combustão normal;

- Combustão catalítica: sistemas catalíticos em desenvolvimento atualmente são capazes de reduzir a temperatura da chama de 1800°C para 1300°C, levando a emissão de NOx de 200 ppm para menos de 1ppm.

3.5.6 Combustão do Gás Natural

Na combustão, a quebra da primeira ligação covalente gera a energia que, subsequentemente, romperá em cadeia as demais ligações, produzindo o calor que pode ser aproveitado. A velocidade que neste processo ocorre distingue as condições entre uma combustão controlada e uma explosão. Para haver a reação de combustão é necessária uma quantidade mínima e máxima de combustível dissolvido no comburente, do contrário, a combustão não ocorrerá. Segundo Subramaniam (1989), estes limites máximo e mínimo, são característicos de cada combustível, variando segundo a temperatura, pressão e energia inicial da combustão. A variação da quantidade de combustível, dentro desses limites, está associada com

a velocidade da reação de combustão.

Na tabela 3.8, pode-se verificar os limites para o gás natural. O limite mínimo de explosão é definido como L.E.L (*low explosive limit*), enquanto o limite máximo é denominado de U.E.L. (*upper explosive limit*). Segundo Kuo (1986), os limites de explosão são para todos os propósitos práticos os mesmos da inflamabilidade. Comparativamente com outros combustíveis, o gás natural tem limites mais estreito, tornando-o menos reativo e, portanto, mais seguro.

Tabela 3.8: Porcentagem de excesso de ar e resultado de combustão. Fonte Sears (1977).

Porcentual de Gás Natural na Mistura	Resultado da Mistura
0 a 4,9%	Mistura Muito Pobre – Não Queimará
5%	Mistura Pobre – Queimará (L.E.L)
14,9%	Mistura Rica – Queimará (U.E.L)
15 a 100%	Mistura Muito Rica- Não queimará

A Fig 3.6, mostra que para o gás natural a concentração do combustível no comburente influencia diretamente a velocidade da chama. A curva da velocidade, assim como, os limites de inflamabilidade, também são uma característica específica do combustível. Para Kuo (1986), é aceitável assumir que a mistura que proporciona a máxima temperatura da chama é também aquela que garante a maior velocidade da mesma. Assim, segundo American Gás Association (1967), o metano é o combustível que necessita de maior energia para quebrar suas ligações, requerendo uma temperatura de chama de no mínimo 785°C para iniciar a decomposição apreciável, o gás natural apresenta velocidades de chama muito superiores.

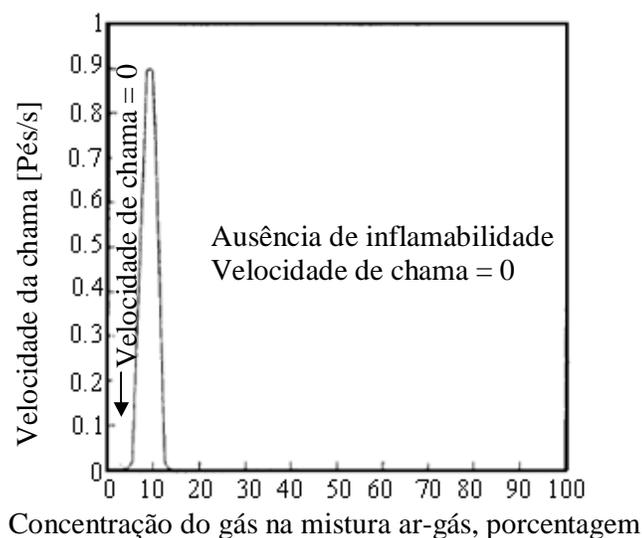


Figura 3.7: Velocidade da queima e porcentagem de excesso de ar. Fonte Sears (1977).

3.5.7 Considerações sobre a Temperatura de Ignição do Gás Natural

O calor liberado por uma mistura reagente e a transferência de calor para as vizinhanças são importantes para determinar o curso do processo de combustão. De acordo com Jones (1993), não é possível a atribuição de uma temperatura de ignição para uma mistura particular, uma vez que a ocorrência da ignição não depende somente dos reagentes, mas também, de como o calor é trocado com as vizinhanças.

A temperatura de ignição é aquela em que uma mistura de combustível e oxidante tem que ser aquecida, para ocorrer uma reação de combustão, considerada mínima para a mistura estequiométrica. Assim, uma baixa temperatura de ignição significa uma mistura potencialmente perigosa. Quanto maior a energia de ativação da reação, maior será a temperatura de ignição. Para misturas que possuem uma alta energia de ativação, uma centelha é necessária para iniciar a combustão. Após esta ignição, o calor gerado torna-se suficiente para que a reação seja auto-sustentável. A tabela 3.9 apresenta os principais combustíveis e suas temperaturas de ignição espontâneas.

Tabela 3.9: Temperatura de ignição espontânea de alguns combustíveis em ar. Fonte Carvalho e Mcquay (2007).

Combustível	Ti (°C)	Combustível	Ti (°C)
Hidrogênio	400	Isopentano	420
Monóxido de carbono	609	Amônia	651
Metano	540	Etanol	365
Etileno	490	Querosene	210
Acetileno	305	Metanol	385
Propano	450	Óleo Diesel	225
Propileno	458	Hidrazina	270
n-Butano	405	Óleo de soja	445
Isobutano	462	Glicerina	370

3.6 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 (Fig.3.8).

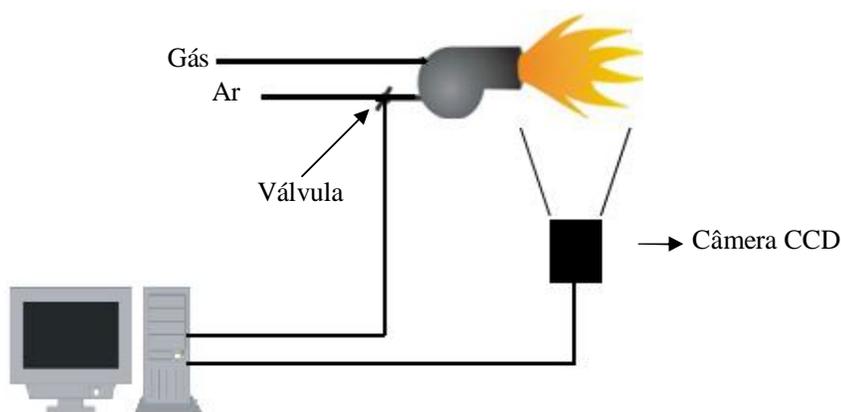


Figura 3.8: Diagrama esquemático do sistema proposto por Sbarbaro et al. (2002).

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 Fig. 3.9, o sistema proposto controla um sistema de alimentação de lixo (que é utilizado como combustível) além da quantidade de ar e de umidade.

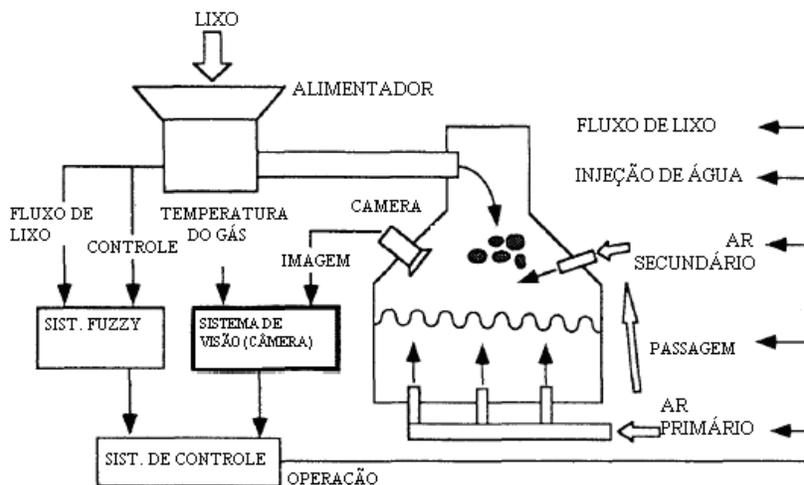


Figura 3.9: Diagrama esquemático do sistema proposto por Miyamoto et al. (1996).

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 Fig. 3.10, fonte Wenjiang et al. (1993).

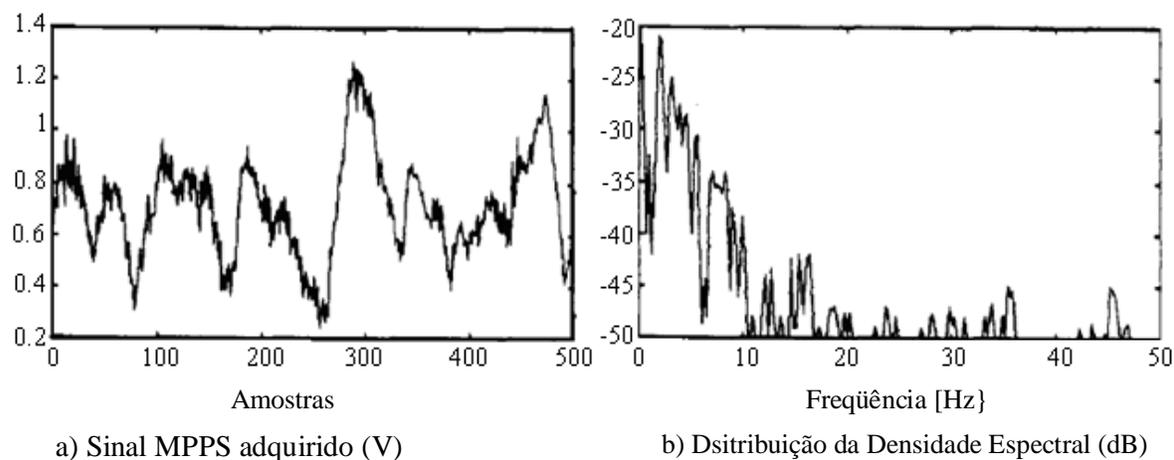


Figura 3.10: O sinal MPPS adquirido e a distribuição espectral, conforme o sistema proposto.

Segundo Bristot (2002), a partir do modelo matemático de um secador cerâmico contínuo, analisou-se diversas estratégias de controle clássico, controle PI, PID e uma técnica de controle preditivo, o Controle Preditivo Generalizado (GPC) baseado no preditor de Smith, visando ajustar os ganhos do controlador analógico PI do sistema de controle de temperatura. A aplicação destas técnicas, ao modelo simulado do secador permitiu compará-las tanto do ponto de vista do comportamento dinâmico como da complexidade de implementação.

Através dos resultados obtidos com as simulações, observaram-se os ajustes a serem implantadas no sistema de controle analógico existente no processo real. A Fig 3.11 apresenta o comportamento da temperatura do secador após alterar o *setpoint* de 157°C para 146°C do controlador PI em duas situações: antes do ajustes dos parâmetros do controlador, onde é perceptível o comportamento oscilatório do sistema; com aplicação dos valores determinados pelas simulações, através destes, ajustou-se os ganhos do controlador, resultando em estabilidade do mesmo.

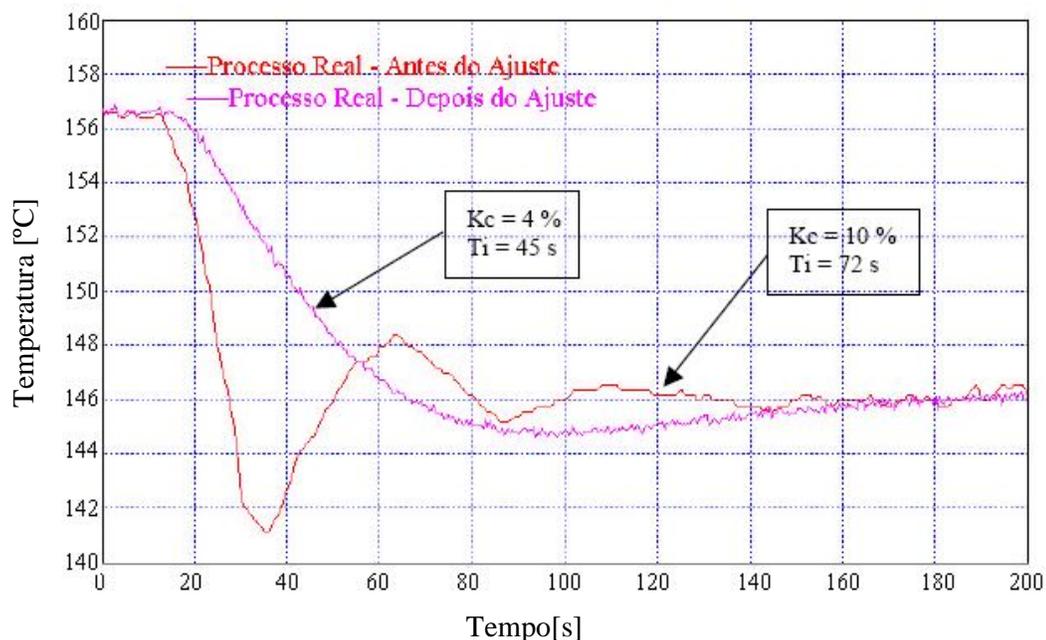


Figura 3.11: Comportamento da temperatura do secador. Fonte Bristot (2002).

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, a proposta é apresentada na Tabela 3.10.

Tabela 3.10: 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

Leston (2007), apresenta o desenvolvimento de um sistema de controle em malha fechada para a temperatura e concentração de oxigênio aplicado em um forno de bancada alimentado gás. A Fig. 3.12, apresenta a implementação dos itens envolvidos no forno.

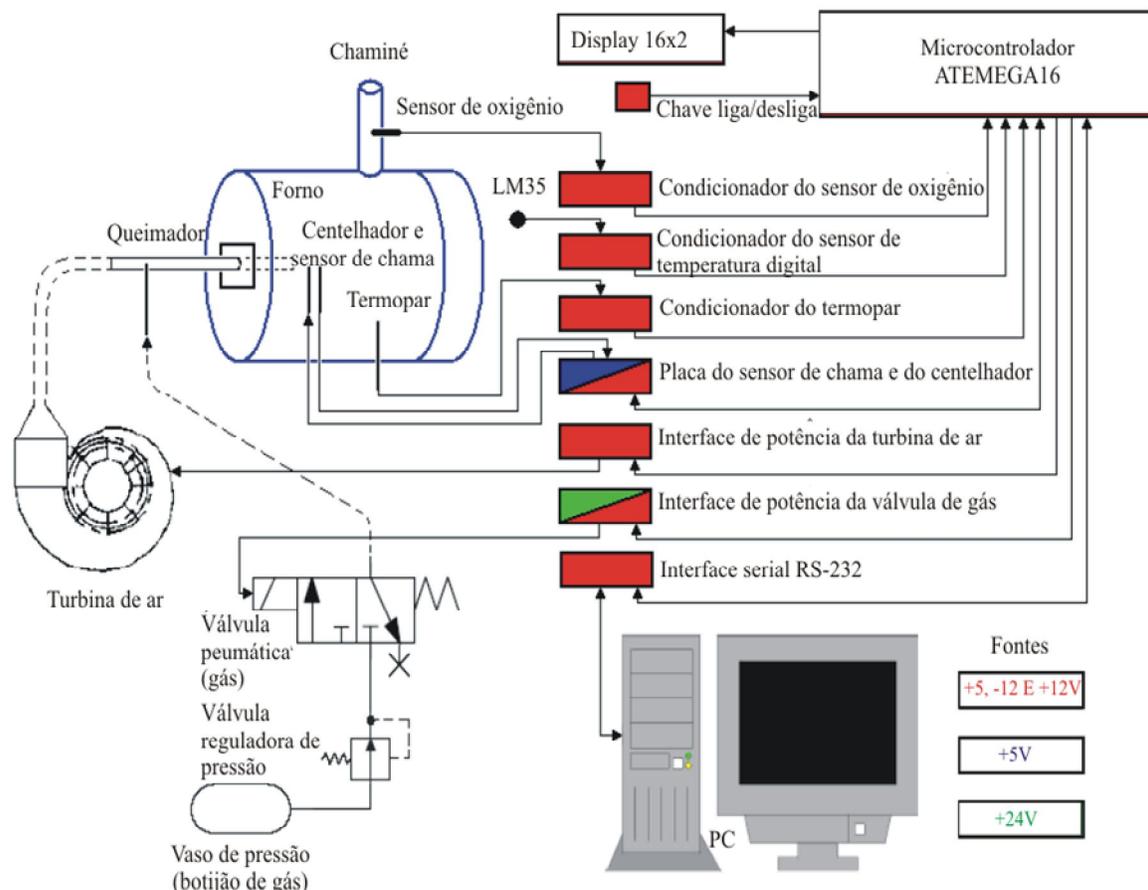
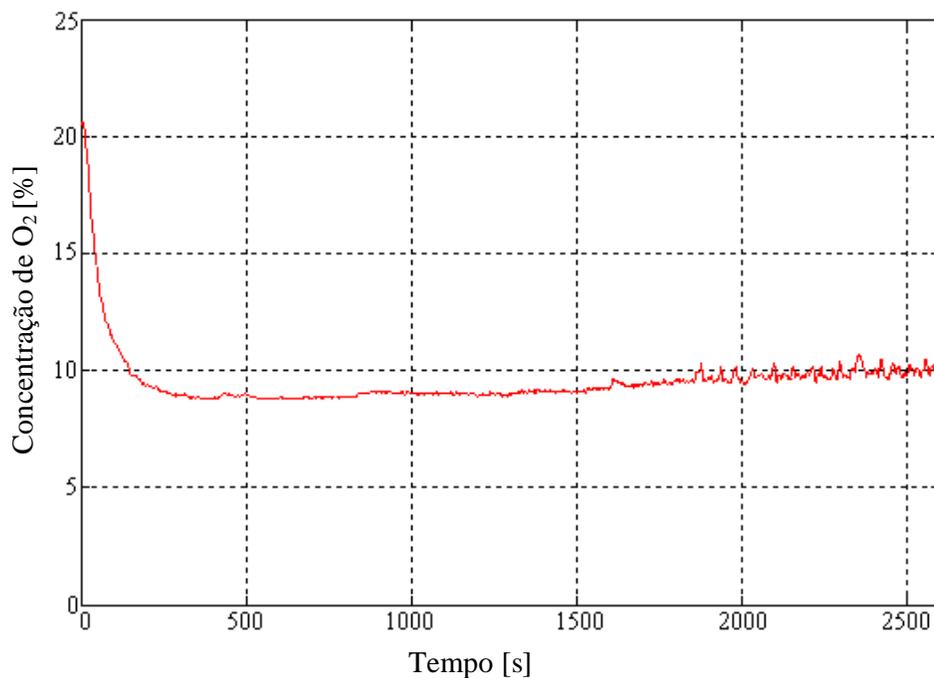


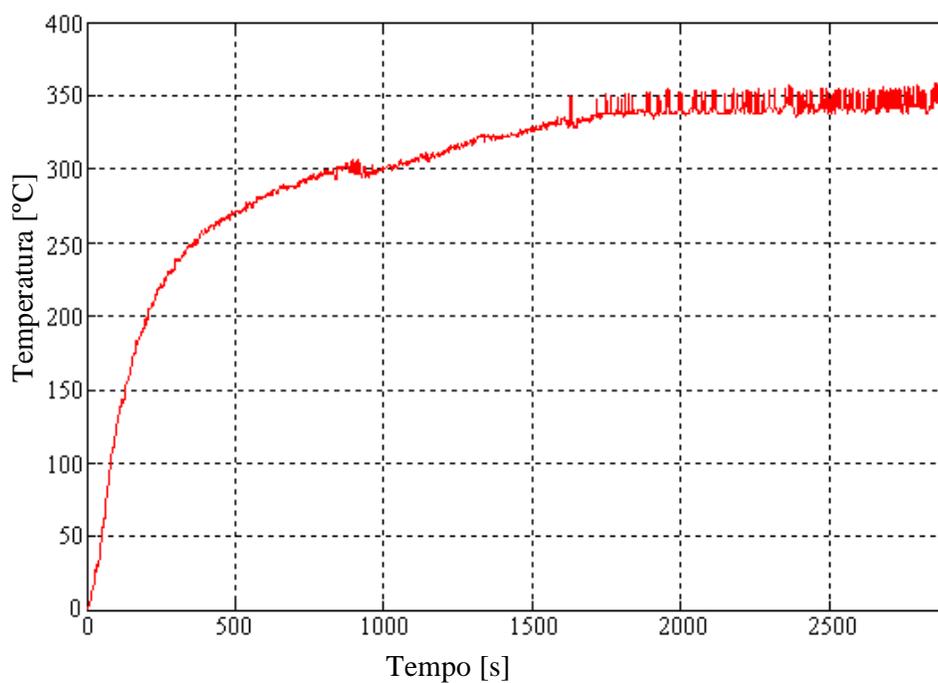
Figura 3.12: Diagrama esquemático das ligações do sistema instrumentação e controle do forno.

Referentes ao forno foram identificadas e mapeadas as condições de operação e, realizou-se a caracterização do funcionamento da válvula de gás (válvula pneumática) e da turbina de ar. Decorrente ao mapeamento das condições de operação do forno criou-se um modelo do funcionamento do mesmo (temperatura e concentração de oxigênio) e, com base nesta análise, desenvolveu-se o algoritmo de controle.

A validação do controle PI desenvolvido foi comprovada através da verificação da convergência dos sinais para os valores de referência desejados. A Fig. 3.13 apresenta os resultados da temperatura desejada de 350°C e para uma entrada O₂ desejada de 10 %, da implementação do forno.



a) Concentração de Oxigênio do Sistema Experimental



b) Comportamento da Temperatura do Sistema Experimental

Figura 3.13 Convergência dos sinais de concentração de oxigênio e temperatura. Fonte Leston (2007).

Conforme Leston (2007), as medições realizadas pelo analisador de gases comprovam que, de uma forma geral, o controle propiciou uma diminuição de emissões dos gases nocivos da combustão (CO , NO e NO_x). Pois a estrutura de controle propiciou uma melhor uniformidade da

combustão através da mistura ar/combustível. Devido à eficiência do controle empregado não existe emissão significativa de hidrocarbonetos (HC) para a atmosfera.

Na Fig. 3.14, podem-se observar as concentrações dos gases CO e HC, obtidos com o analisador de gases, através dos testes experimentais do sistema completo implementado.

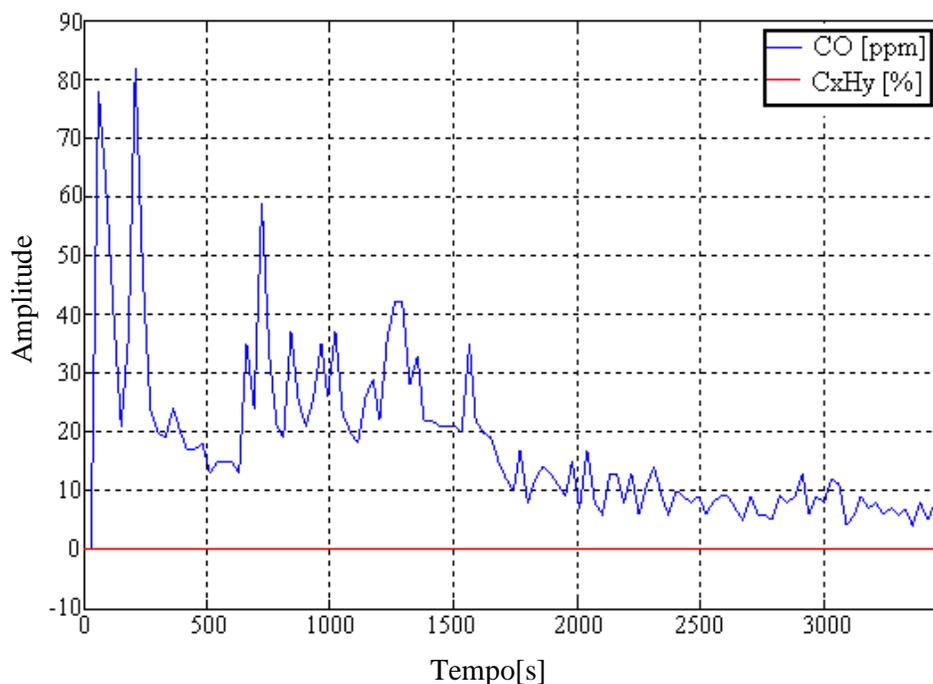


Figura 3.14: Concentrações de CO e HC medidas com o analisador de gases durante o teste de controle do sistema experimental. Fonte Leston (2007).

Através da linguagem computacional C, Mendes et. al, (2007) desenvolveram um *software*, tendo como finalidade controlar a temperatura da água, através do *hardware* bi-térmico. Para determinar o modelo matemático, que proporcione ao sistema resposta rápida e precisa, sem ocasionar oscilações, foram testados os métodos de Ziegler/Nichols, Hägglund e Mollenkanp. Busca-se determinar o método que forneça o modelo matemático que apresente a melhor resposta diante das características do sistema, quando aplicado ao controlador PI e PID. Segundo os autores, após determinar os modelos em função dos respectivos métodos, os mesmos foram testados no sistema em estudo aplicando um degrau e fixados os valores de K_i em 0,02 e K_p 0.9. A comparação das respostas do sistema em função dos modelos encontrados, apresenta que ambos não fornecem oscilações ao sistema em estudo, contudo apenas o modelo de Ziegler/Nichols proporcionou a resposta mais próxima das características necessárias descritas acima.

4 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 secador.

4.1 Introdução

A implementação industrial do sistema de instrumentação e controle do secador foi realizada na Eliane Revestimentos Cerâmicos. Na Fig. 4.1 é apresentado o secador com o esquema do sistema de controle acoplado.

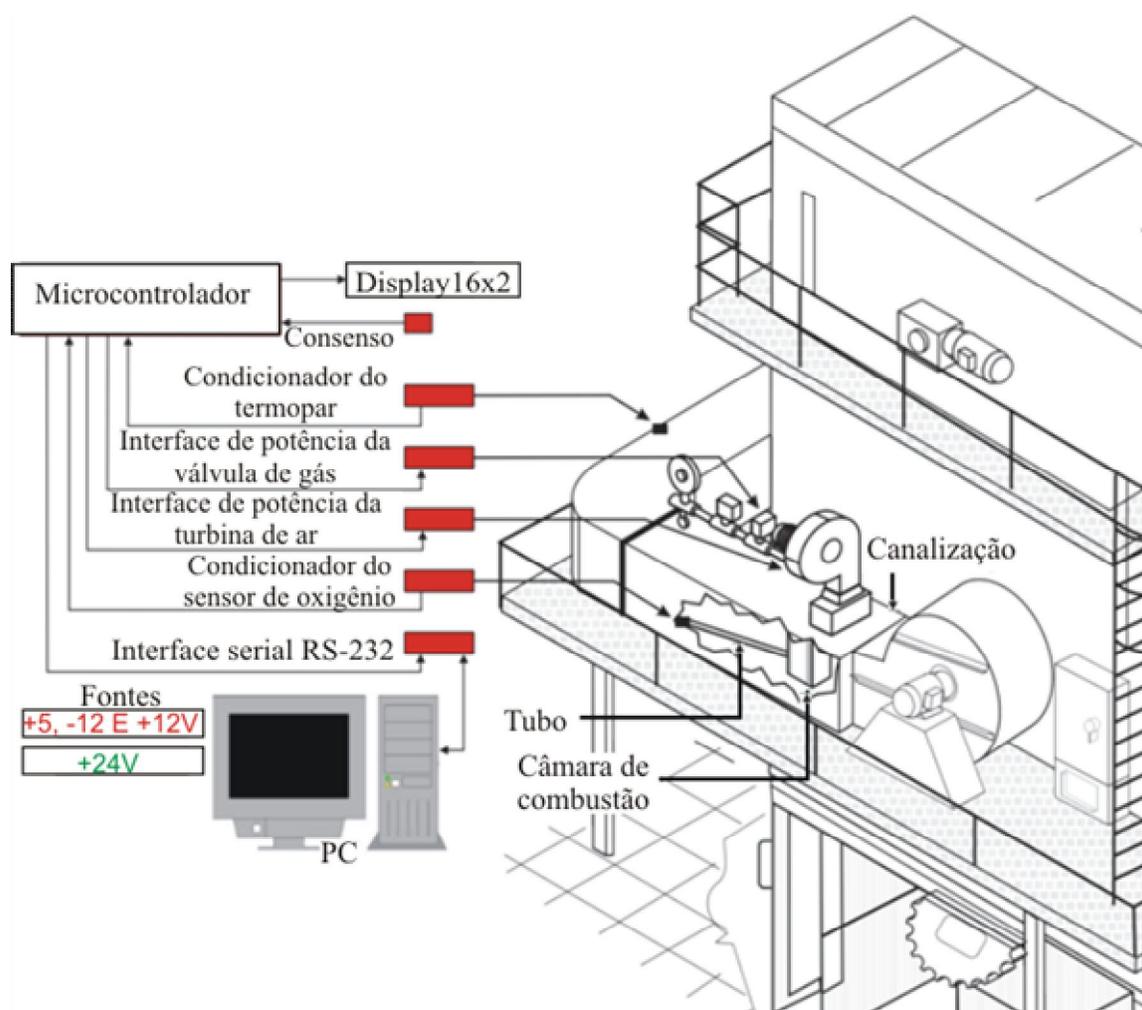


Figura 4.1: Implementação industrial do sistema de instrumentação e controle do secador.

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 no servo mecanismo (vazão de gás) e no ventilador de combustão (vazão de ar). Assim, as informações de monitoramento do sistema são enviadas a um *display* e ao sistema de supervisão. O sistema em questão foi desenvolvido através da ferramenta de programação *Delphi* e dispõe de três telas de apresentação de dados com diferentes funções: na primeira tela visualiza-se o gráfico da temperatura. Na segunda são apresentados os parâmetros do sistema (como, por exemplo, o *set point* parado e em modo produção). Pode-se também, através dos comandos desta tela, realizar a busca no banco de dados e analisar o comportamento térmico do secador. Já, na terceira tela tem-se a visualização dos gráficos das medições de oxigênio e as informações referentes ao sensor de oxigênio.

No sistema proposto, conforme apresentado na Fig. 4.1, foi realizada uma alteração mecânica no secador. A inserção de um tubo de diâmetro de 5 centímetros, no centro do queimador com a finalidade de captar os gases provenientes da combustão e direcioná-los por meio deste ao sensor de oxigênio. Esta alteração foi necessária devido a dois fatores:

- As especificações do fabricante impedem que os condutores elétricos do sensor de oxigênio fiquem expostos a temperaturas elevadas. Caso optar-se por fixar o sensor na câmara de combustão, os mesmos ficariam expostos ao ar de recirculação, o qual apresenta uma temperatura aproximadamente de 80°C, comprometendo a vida útil do mesmo;
- Com a realização de alguns testes para avaliar a leitura do sensor de oxigênio na parede da canalização do ar de recirculação, no interior da qual está instalada a câmara de combustão (vide Fig 4.1). Constatou-se que, indiferente da relação ar+combustível proporcionada para combustão, que as leituras realizadas pelo sensor de oxigênio não caracterizam a combustão. Isto ocorre devido à diluição dos gases de combustão no ar proveniente do ventilador de recirculação, interferindo na leitura do sensor. Isto impossibilita a sua instalação em qualquer ponto da parede da canalização.

Observa-se que o sistema da geração da centelha de ignição necessária para iniciar o processo de combustão e de identificação da presença de chama utilizado pelo sistema permanece inalterado.

Seguem as descrições dos diversos componentes do sistema de controle.

4.2 Sensor de Oxigênio

Comumente conhecido como sonda Lambda, tem como objetivo a geração de um sinal de comando para a unidade de injeção, de modo que ela possa variar a quantidade de combustível

disponibilizado e, assim, garantir uma mistura ar/combustível apropriada, reduzindo os níveis de emissões de gases poluentes.

A sonda Lambda de zircônio e ítrio é o modelo mais difundido atualmente. Constituída de um elemento de cerâmica (óxido de zircônio e óxido de ítrio), que está recoberto tanto internamente como externamente, por uma camada de platina que cumpre a função de eletrodo.

O sensor de oxigênio utilizado é do tipo banda larga, modelo LSU4, do fabricante Bosch. Este sensor é composto por duas partes a célula de referência Nernst e a célula chamada de bomba de oxigênio, acopladas em um mesmo encapsulamento (vide Fig. 4.2). O sensor de oxigênio também contém uma câmara de referência e um elemento de aquecimento. A denominação banda larga origina-se pelo fato de abranger com precisão e linearidade uma faixa de medição de concentrações de oxigênio maiores que os sensores automotivos comuns.

O sinal de tensão produzido pela sonda Lambda é acoplado ao controlador através da primeira entrada analógica do microcontrolador PIC. Apresenta como função o monitoramento da mistura ar/combustível a fim de que o sistema de controle possa manter a mesma ou o mais próximo possível da relação estequiométrica. A variação do sinal da sonda Lambda situa-se entre 0 a 5Vcc.

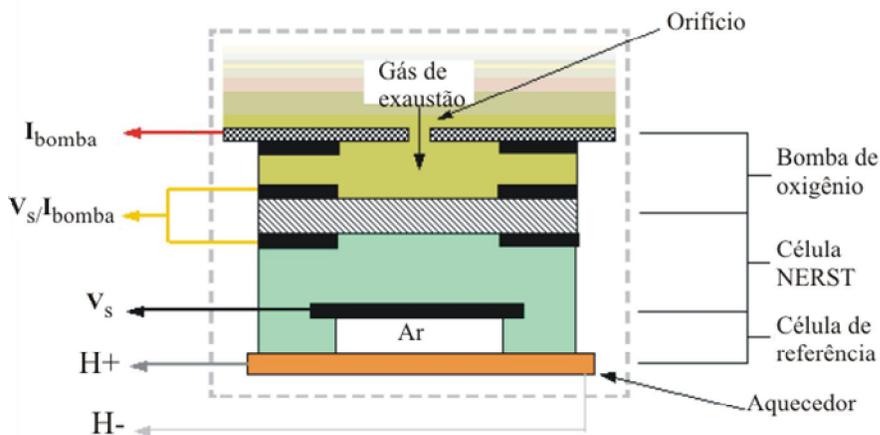


Figura 4.2: Esquema construtivo do sensor de oxigênio de banda larga modelo LSU4.

O condicionador de sinal utilizado para o sensor de oxigênio de banda larga é o modelo LC-1 do fabricante Inovate, o qual possui uma saída analógica linear de 0 a 5V, conforme a concentração de oxigênio medida pelo sensor.

4.3 Termopar

O termopar utilizado é do tipo K, que pode medir temperaturas na faixa de -200 a 1300°C

é empregado para realizar a leitura da temperatura no interior do secador. Através da Fig. 4.1 é possível observar a sua localização no sistema.

A Fig. 4.3 representa o sistema condicionador do sinal do termopar na entrada do PIC. É composto por quatro amplificadores operacionais. Os três primeiros formam a configuração de diferenças, que apresenta como principal função realizar o “casamento” de impedâncias. O quarto amplificador operacional tem a finalidade de amplificar o sinal, o qual tem o seu ganho ajustado através do potenciômetro, antes de ser acoplada na segunda entrada analógica do microcontrolador PIC.

No circuito abaixo estão indicados e especificados os componentes utilizados no condicionador do sinal do termopar. Os capacitores atuam como filtros, a fim de evitar que interferências da planta comprometam a leitura do termopar.

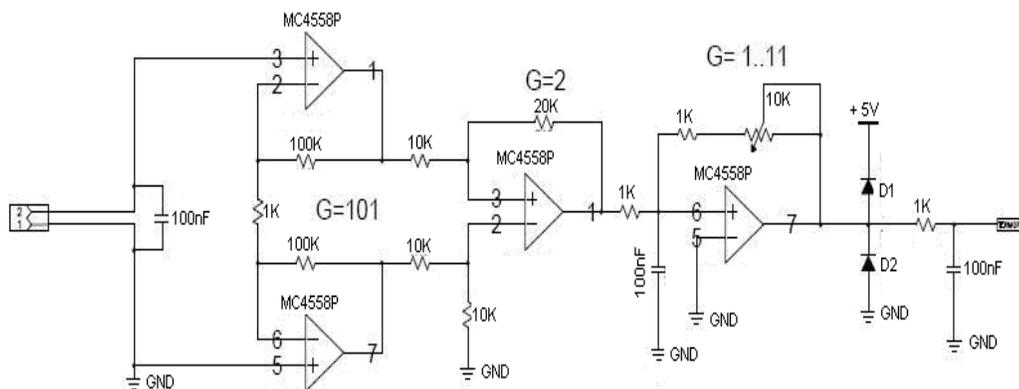


Figura 4.3: Circuito eletrônico de acoplamento do termopar

4.4 Inversor de Frequência

Neste sistema, o inversor de frequência tem a finalidade de controlar a variação da velocidade de um motor de acionamento do ventilador de combustão. O inversor utilizado disponibiliza funções e recursos que permitem proteger e controlar o motor elétrico de forma fácil e eficaz. Permite, por exemplo, o controle dos tempos de aceleração, desaceleração e proteção contra sobrecargas.

O inversor utilizado é da marca WEG[®], que trabalha com controle vetorial. De acordo com Franchi (2008), o avanço das técnicas de controle permitiu que novas estruturas de comando geradas pudessem atender às solicitações do controle de velocidade com respostas rápidas e de alta precisão, deste modo, a operação do inversor é otimizada para o motor em uso, obtendo-se um melhor desempenho em termos de torque e regulagem de velocidade.

O controle vetorial programado é o modo *sensorless*, não necessita de um sinal de

realimentação de velocidade (sensor de velocidade como tacogerador ou encoder no eixo do motor). Para que o fluxo do entreferro do motor e, conseqüentemente, a sua capacidade de torque mantenham-se constantes durante toda a faixa de variação de velocidade, o sistema de controle do inversor possui um algoritmo sofisticado que leva em conta as características construtivas do motor de indução. Dessa forma, consegue-se manter o fluxo no entreferro do motor aproximadamente constante para freqüências de até 1Hz, com variação na regulação de velocidade na ordem de 0,5% da rotação nominal do motor.

O circuito integrado MCP421T-E/SN é responsável pelo condicionamento do sinal analógico usado para referenciar a rotação do ventilador de combustão, com uma resolução de 12 bits (4096 níveis de tensão entre 0 a 5Vcc). Devido à entrada analógica do inversor de freqüência ser de 0 a 10V, faz-se necessário o uso de um amplificador operacional, trabalhando na configuração não inversora com ganho 2 (vide Fig. 4.4). Deste modo, ocorre a compatibilidade dos níveis de tensão entre a entrada analógica do inversor e do microcontrolador PIC.

O controle do DAC (Conversor Analógico Digital) é realizado com a utilização da comunicação SPI (*Serial Protocol Interface*), cujo PIC é o dispositivo mestre e o DAC é o dispositivo escravo. A comunicação SPI é do tipo síncrona, sendo que um dispositivo envia os sinais de clock (SCK) com a informação desejada, gerando assim, um pulso de clock para cada informação. Segundo especificações do DAC, após o envio da informação é necessário encaminhar um pulso de nível lógico baixo através do pino LDAC, para que o mesmo efetivamente converta o valor digital em analógico. A taxa de atualização corresponde a 100 ms.

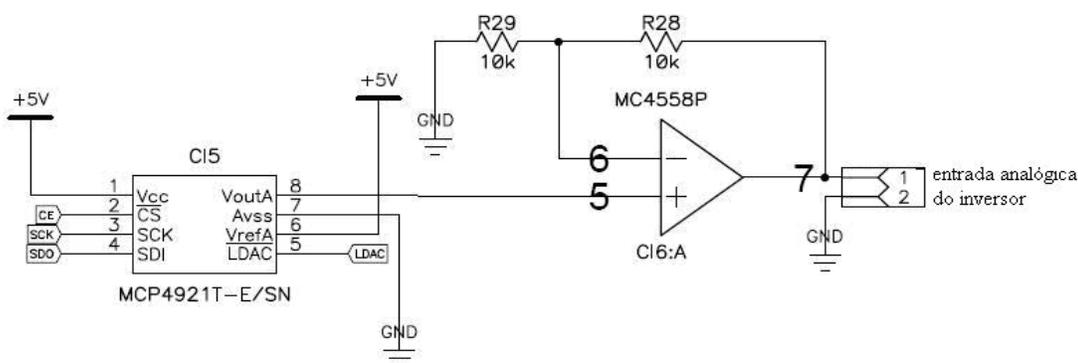


Figura 4.4: Circuito eletrônico de acoplamento do inversor de freqüência.

4.5 Microcontrolador

O microcontrolador é do modelo PIC 16F877A, do fabricante Microchip, baseado na arquitetura RISC (*Reduced Instruction Set Computing*) com 35 instruções. Na Tabela 4.1 estão apresentadas algumas das características técnicas do microcontrolador.

Tabela 4.1: Dados técnicos do microcontrolador PIC 16F877A.

Memória Flash Programável	8 Kbytes
RAM	368 bytes
Ciclos de Gravação	1000 ciclos
Contadores/Timers	2 x 8 bits e 1 x 16 bits
Canais PWM	2 x 10 bits
Entradas Analógicas	10 x 10 bits
Porta de Comunicação Serial	1
Entradas Digitais Programáveis	35
Encapsulamento	40 pinos PDIP
Frequência de Trabalho	5MIPS @ 20MHz
Tensão de Operação	4,5 ~ 5,5 V
EEPROM	256 bytes

O display é do modelo Tech1602b, fabricado por Linpo Technology e, também, apresenta um visor com duas linhas e dezesseis colunas. Através deste, o operador tem a possibilidade de interagir com o sistema, pois o display mostra as informações do status do equipamento relacionado ao ponto estequiométrico e térmico. Acoplou-se ao *display* um teclado em forma de matriz, formado por doze botões de pulsos, que estão ligados a seis entradas digitais (vide Fig. 4.5). Por meio deste, o operador tem acesso à leitura e alteração dos parâmetros relacionados aos dados pertinentes do secador. É importante salientar que existem dois meios para realizar a leitura e alteração dos parâmetros. O primeiro está descrito acima e o segundo ocorre através do sistema de supervisão (alocado no micro computador).

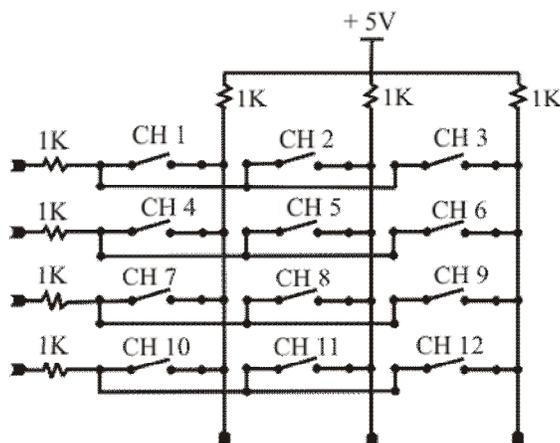


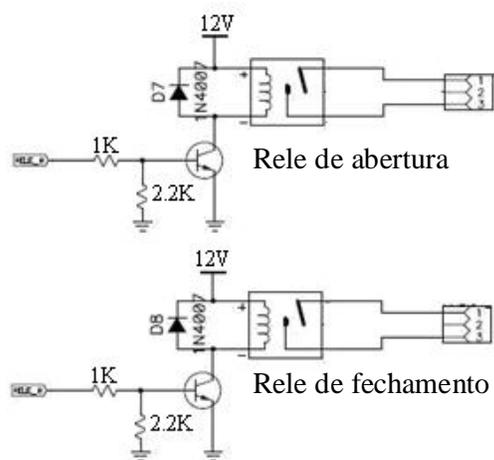
Figura 4.5: Teclado matricial.

A interface serial RS-232 é implementada através do circuito integrado MAX-232 do fabricante Texas Instruments. Consiste em um duplo transmissor/receptor que contém um gerador de tensão capacitivo para suprir os sinais segundo os níveis da norma TIA/EIA-232-F, a partir de uma fonte de 5V. Cada receptor converte os sinais de entrada normalizados TIA/EIA-232-F para os níveis de 5V de TTL/CMOS. Esses receptores têm como valor de disparo típico 1,3V e histerese típica de 0,5V e, aceita valores de entrada até $\pm 30V$. Cada transmissor converte as entradas dos níveis TTL/CMOS para os níveis normalizados TIA/EIA-232-F. A cada tempo de amostragem de 1s o microcontrolador envia todos os dados envolvidos no sistema de controle do secador para o sistema de supervisão.

4.6 Servo Válvula

A servo válvula utilizada é fabricada pela empresa Sibec. É constituída de um motor elétrico monofásico com tensão de operação de 220Vca e 60Hz, apresentando uma caixa de redução acoplada e duas chaves fim de curso, que tem a função de limitar a abertura máxima e mínima da válvula. Este conjunto tem a finalidade de movimentar a válvula de gás natural através de um braço articulado, conforme a Fig. 4.6b.

O mecanismo empregado possui tempo de resposta de 30 segundos, tanto na operação de abertura como no fechamento máximo. O sinal elétrico para a movimentação da servo válvula é proveniente de dois relés eletromecânicos pertencentes ao controlador (vide Fig. 4.6a). Um relé é responsável pela abertura e outro pelo fechamento. A caixa de redução é responsável por manter inalterada a posição da válvula após o término do acionamento do motor elétrico.



a) Diagrama eletrônico de acionamento dos relés. b) Servo válvula.

Figura 4.6: Servo Válvula conectada à válvula do gás natural.

4.7 Ventilador de Combustão

Possui um motor elétrico trifásico de indução de 2.2kW, com rotação nominal de 3700rpm. Apresenta a finalidade de aspirar o ar do ambiente externo e insuflá-lo para o sistema de queima, conforme a Fig. 4.7. Este é acionado através do inversor de frequência do fabricante Weg, que está conectado a um canal analógico do microcontrolador.

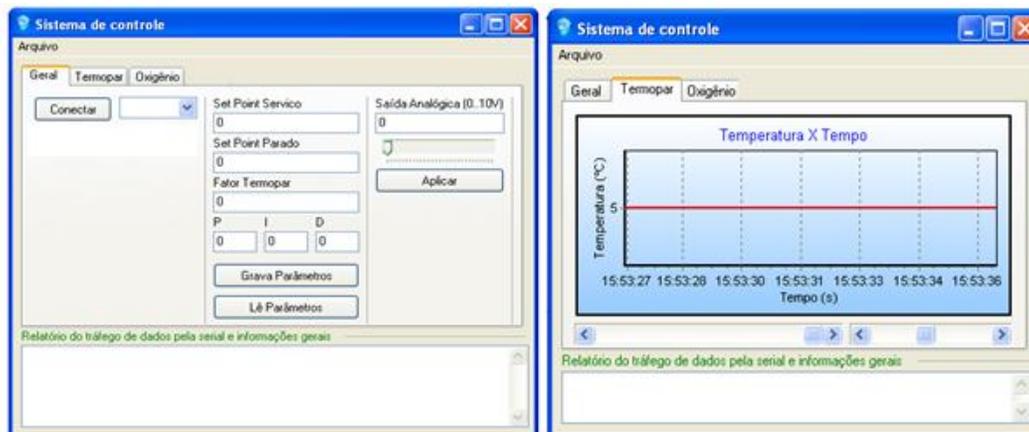


Figura 4.7: Ventilador de combustão.

4.8 Sistema de Supervisão

Este sistema foi desenvolvido com a ferramenta de programação *Delphi 7*. É constituído por três telas. A primeira é denominada de “Geral” e apresenta as funções de configuração do sistema, que consiste no ajuste dos ganhos do sistema e do *set point* da variação manual da referência de velocidade do ventilador de combustão (vide Fig. 4.7a). As outras duas telas são denominadas de “Termopar” (vide Fig. 4.7b) e de “Oxigênio”. São responsáveis pela apresentação gráfica do comportamento térmico e estequiométrico do secador.

O sistema supervisor permite que os gráficos e leituras efetuadas durante o controle do processo possam ser salvos graficamente em formato de figura ou no formato de texto, para serem utilizadas em futuras análises.



a) Tela de parâmetros do sistema. b) Tela de comportamento térmico do secador.

Figura 4.8: Telas do sistema de supervisão.

4.9 Fonte de Alimentação

O controlador apresenta uma fonte de alimentação com dois níveis de tensões, a qual fornece ao sistema as tensões de $-5V$, $+5V$ e $-12V$, $+12V$, conforme mostra a Fig. 4.8. Através de um transformador com derivação central, o nível de tensão da rede elétrica é rebaixado de $220V$ para $12V$, após este procedimento, o sinal elétrico é submetido a quatro diodos para retificação em ponte.

Os níveis de tensões simétricos são regulados através dos circuitos impressos LM79-05 e LM78-05, respectivamente, para as tensões $-5V$ e $+5V$ (vide Fig. 4.8a). Os LM79-12 e LM78-12 para, respectivamente, tensões de $-12V$ e $+12V$ (vide Fig. 4.8b). Na topologia da fonte há capacitores responsáveis pela correção do *ripple*. Nesta configuração a fonte simétrica apresenta estabilidade necessária para operação do sistema.

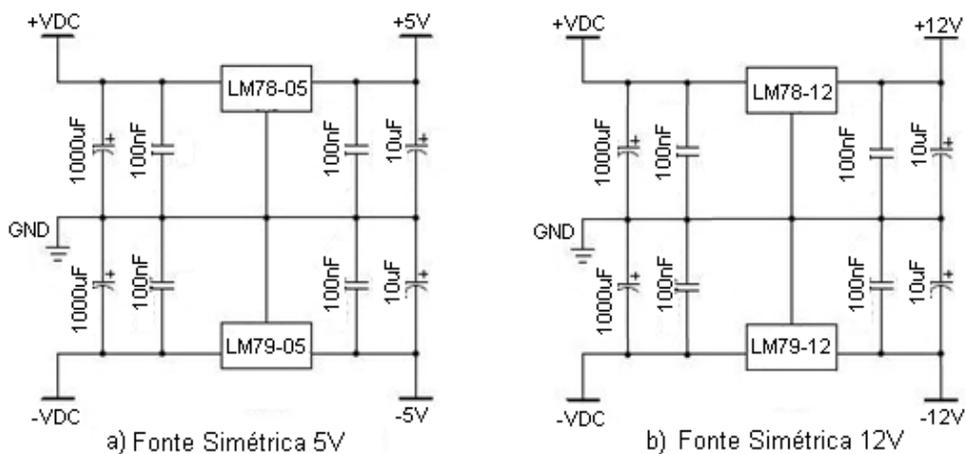


Figura 4.9: Fonte de alimentação simétrica.

5 PROJETO DE CONTROLADOR PID PARA TEMPERATURA E ESTEQUIOMETRIA

Neste capítulo são apresentados os controladores empregados no protótipo. Esses controladores operam a partir dos sinais medidos com o objetivo de fazer que as saídas de interesse do sistema físico convirjam para os valores de referência à medida que o tempo avança.

Para determinar o modelo matemático do comportamento do secador, são aplicados aos mesmos ensaios do tipo *step test* (testes com aplicação de funções tipo degrau), realizados com o sistema real funcionando em diversas situações. A validação modelo obtido através da identificação foi realizada com as medições da temperatura e estequiometria no secador com protótipo instalado.

5.1 Modelagem Matemática do Secador Através da Técnica de Identificação

A modelagem do comportamento dinâmico de um processo é uma etapa fundamental do procedimento de definição de um sistema de controle. A obtenção de um modelo matemático que represente o funcionamento de um processo industrial deve satisfazer dois requisitos básicos. Primeiramente, o modelo deve ser suficientemente completo para representar de maneira fiel a dinâmica dominante do sistema. Por outro lado, o modelo deve ser suficientemente simples para permitir a definição do sistema de controle de baixa complexidade e fácil utilização pelos operadores.

A dinâmica de muitos sistemas físicos é geralmente descrita em termos de equações diferenciais, podem ser obtidas utilizando-se as leis que as governam. Porém, um modelo completo pode depender do conhecimento de vários parâmetros que são difíceis de medir no processo em estudo. Uma alternativa a esta metodologia (analítica) é a obtenção do modelo através da identificação do sistema. Assim, através de dados experimentais é possível, por exemplo, encontrar as expressões da função de transferência do sistema. Nesta metodologia, o principal objetivo na utilização da aquisição de dados não é a geração de históricos de variáveis de processo, mas sim, criar um elemento básico para a execução de análises e avaliações, além de possibilitar a utilização de técnicas no desenvolvimento de novas aplicações para a planta [Coelho e Coelho, (2004)].

Para a aquisição de dados, foi utilizado o *software* de supervisão, devido a sua característica de permitir salvar as informações em arquivo do tipo texto (vide Fig. 5.1). A metodologia adotada para análise de comportamento do sistema foi em malha fechada, já que o

secador não pode ser parado para ensaios de malha aberta, sem que ocorram prejuízos de produção. Dessa forma, procedeu-se a realização de ensaios e levantamento de dados em operação normal.

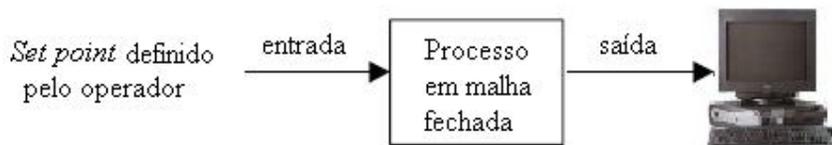


Figura 5.1: Estrutura utilizada na identificação da dinâmica do secador.

5.2 Obtenção do Modelo Matemático do Secador Vertical Cerâmico

A modelagem matemática de um processo dinâmico pode ser definida como a determinação de um conjunto de equações que o representam sob determinadas condições. O sistema pode ser representado por várias maneiras diferentes e, portanto, podem existir muitos modelos matemáticos que representam o comportamento deste. Por isso, optou-se por uma descrição simplificada, tendo em mente o compromisso entre simplicidade do modelo e sua fidelidade na representação. Como comentado anteriormente, no processo em questão, o modelo foi obtido a partir das leituras realizadas no secador e coletadas experimentalmente. Sendo utilizada neste trabalho a identificação pelo teste de resposta ao degrau em malha fechada. O modelo resultante é uma relação existente entre o sinal de entrada do processo e a saída, caracterizada pela função de transferência do processo em malha fechada.

Conforme Coelho e Coelho (2004), com base na resposta temporal é possível mensurar pontos para auxiliar a aplicação de diferentes métodos de identificação. Na literatura existe uma variedade de métodos baseados na resposta do processo ao degrau para identificação dos parâmetros de ganho (K), atraso de transporte (τ) e a constante de tempo (θ). Entre os disponíveis na literatura, existem os seguintes métodos: Ziegler/Nichols, 1942; Sundaresan, 1977; Nishikawa, 1984; Smith, 1985; Häggglund, 1991; Mollenkamp, 1988; Seborg *et al.*, 1989 e Dorf e Bishop, 1995.

Com os gráficos obtidos do secador no período de uma semana de acompanhamento do secador (vide exemplos no Apêndice 4) referentes a temperatura e estequiometria, utilizou-se para análise dos mesmos o procedimento gráfico/matemático para a identificação das respectivas funções de transferência, o método de Mollenkamp. Através dos gráficos das variáveis citadas acima, são identificados três pontos intermediários nos gráficos, isto é, t_1 - tempo para a saída alcançar 15% da mudança total final; t_2 - tempo para a saída alcançar 45% da mudança total final; t_3 - tempo para a saída alcançar 75% da mudança total final. Com base

nestes instantes de tempo, os parâmetros do modelo matemático das variáveis são calculados pelo seguinte algoritmo [Coelho e Coelho, (2004)]:

$$x = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1} \quad (5.1)$$

A obtenção do coeficiente de amortecimento (ξ) do sistema em estudo é expresso pela eq. (5.1), através da variável auxiliar (x).

$$\xi = \frac{0.0805 - 5.547(0.475 - x)^2}{(x - 0.356)} \quad (5.2)$$

Conhecendo o valor do coeficiente de amortecimento (ξ), através do algoritmo, determina-se os valores de $f_2(\xi)$ para $\xi < 1$ a eq. (5.3), e para valores de $f_2(\xi)$ para $\xi \geq 1$ a eq. (5.4).

$$f_2(\xi) = (0.708)(2.811)^\xi \quad (5.3)$$

$$f_2(\xi) = 2.6\xi - 0.60 \quad (5.4)$$

Através da eq. (5.5) determina-se a frequência natural do sistema.

$$\omega_n = \frac{f_2(\xi)}{t_3 - t_1} \quad (5.5)$$

$$f_3(\xi) = (0.922)(1.66)^\xi \quad (5.6)$$

Com a obtenção do valor da variável $f_3(\xi)$ pela eq. (5.6), determina-se a constante de tempo (θ) através da eq. (5.7).

$$\theta = t_2 - \frac{f_3(\xi)}{\omega_n} \quad (5.7)$$

Através da eq. (5.8), determinam-se os valores das constantes de atraso de transporte ($\tau_{1,2}$) do sistema.

$$\tau_{1,2} = \xi \pm \sqrt{\frac{\xi^2 - 1}{\omega_n}} \quad (5.8)$$

O modelo matemático referente à temperatura e à estequiometria do secador (expressa nas equações (5.9) e (5.10)) é obtido a partir de ensaios do tipo *step test*, através da aplicação do método Mollenkamp. Este método permitiu identificar características do processo que têm interesse do ponto de vista do operador, tais como: o valor do ganho da(s) constante(s) de tempo

e de atraso, que são fundamentais para construção do sistema de controle.

$$Pt_{(s)} = \frac{\text{Temperatura}}{\text{Abertura_Gás}} = \frac{0,121e^{-11,99s}}{(72,22s + 1)(8,44s + 1)} \quad (5.9)$$

$$Pe_{(s)} = \frac{\text{Vazão_ar}}{\text{Rotação_Ventilador}} = \frac{0,45e^{-1,63s}}{(4,26s + 1)} \quad (5.10)$$

5.3 Estrutura de Controle Adotada

O controle adotado foi do tipo PID (Proporcional + Integral + Derivativo). Optou-se inicialmente por este tipo de controlador, pois ele é o controle geralmente aplicado à maioria dos sistemas de controle de processos contínuos. No campo destes processos, as estruturas de controle PID já provaram a sua utilidade, ao proporcionar controle geralmente satisfatório. A Eq. (5.11) expressa a estrutura do controle PID. Através da Fig. 5.2 pode ser observada a representação do diagrama de blocos de um controlador PID.

$$u(t) = k_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5.11)$$

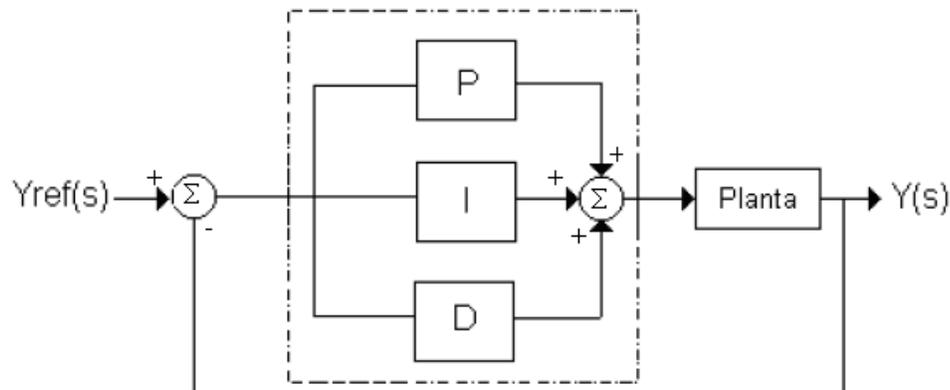


Figura 5.2: Diagrama de blocos de um controlador PID.

O termo de natureza integral tem a característica de fornecer uma saída não nula após o sinal de erro ser zerado. Este comportamento é consequência do fato de que a saída depende dos valores passados do erro e não do valor atual. Em outras palavras, erros passados “carregam” o integrador com um determinado valor, que persiste mesmo quando o erro se torna nulo. Esta

característica tem como resultado que as perturbações constantes podem ser rejeitadas, como erro nulo, já que, diferentemente do que ocorre com controladores proporcionais, neste caso não é necessário que o erro seja não nulo para dar origem a um sinal de controle que cancele o efeito da perturbação.

A principal razão para a presença do termo de natureza integral é reduzir ou eliminar erros estacionários. Esse termo corresponde a um acréscimo de um pólo na origem da função de transferência de malha aberta (no caminho direto). Em contrapartida, esse benefício geralmente é obtido à custa de uma redução da margem de estabilidade ou do amortecimento do sistema.

O termo derivativo tem o papel de aumentar o amortecimento e, em geral, melhorar a estabilidade de um sistema. Intuitivamente, a ação do termo derivativo pode ser entendida quando consideramos um controlador PD (Proporcional + Derivativo) no instante em que o erro é momentaneamente nulo, porém, sua taxa de variação não é considerada nula. Nesse caso, o termo proporcional não terá contribuição alguma sobre a saída. Já, o termo derivativo sim; este último tem o papel de fazer que o controlador se antecipe à ocorrência do erro. Essa característica de tornar o controlador sensível à taxa de variação do erro tem claramente o efeito de aumentar o amortecimento do sistema. A combinação dos termos de natureza proporcional, integral, e derivativa é normalmente utilizada para obter-se um grau aceitável de redução de erro estacionário, simultaneamente, com boas características de estabilidade e amortecimento.

Os efeitos de cada um dos controladores em um sistema de malha fechada, estão sintetizados na tabela abaixo:

Tabela 5.1: Características das respostas dos controladores.

Comportamento dos Ganhos	Tempo de Subida	<i>Overshoot</i> (Sobre-sinal)	Tempo de Acomodação	Erro de Estado Estacionário
K_p	Diminui	Aumenta	Peq. Mudança	Diminui
K_i	Diminui	Aumenta	Aumenta	Elimina
K_d	Peq. Mudança	Diminui	Diminui	Peq. Mudança

As correlações podem não ser exatamente obtidas, porque as ações de controle (proporcional, integral e derivativa) são interdependentes. Na verdade, a alteração de um dos ganhos (K_p , K_i ou K_d) pode ocasionar mudança no efeito das outras duas. Por esta razão, a tabela deve somente ser usada como uma referência quando os valores de K_p , K_i e K_d estiverem sendo determinados.

5.4 Ajuste dos Ganhos dos Controladores

Para ajustar adequadamente os ganhos das ações derivativa, proporcional e integral dos controladores foi utilizado 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. Os ganhos alcançados com a ferramenta de otimização para o sistema de controle de temperatura e estequiometria foram estipulados através de simulações utilizando o modelo desenvolvido (vide Figura 5.3), com as respectivas funções de transferência citadas acima. Os ganhos do controle de temperatura e estequiometria foram:

- Ganhos do controle de temperatura: K_d (ganho derivativo) = 2,225; K_p (ganho proporcional) = 22,238 e K_i (ganho integral) = 0,3081
- Ganhos do controle estequiométrico: K_d (ganho derivativo) = 2,027; K_p (ganho proporcional) = 12,618 e K_i (ganho integral) = 1,1041.

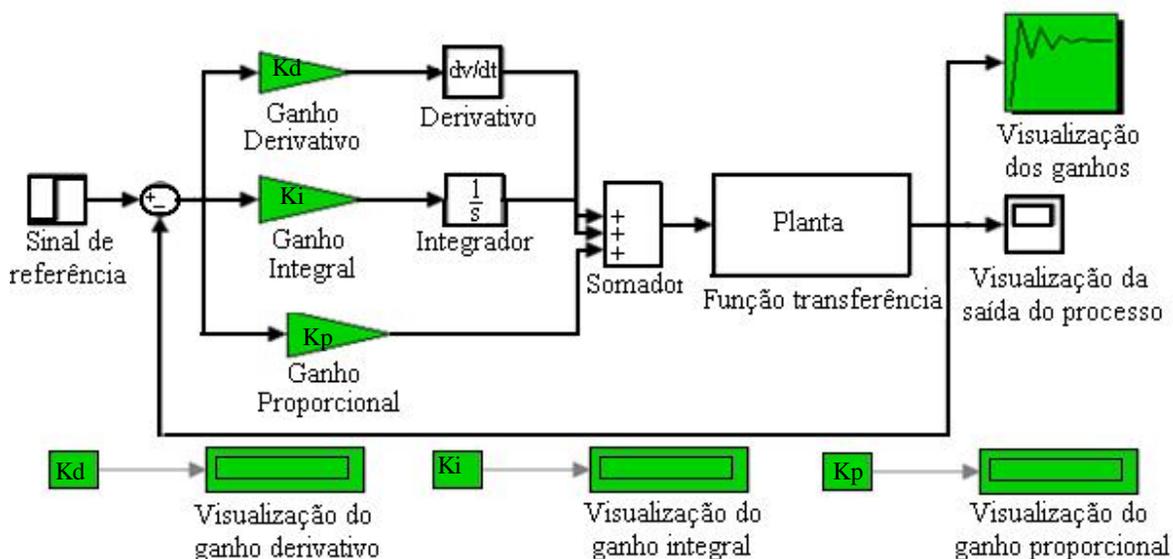


Figura 5.3: Estrutura de controle utilizada para determinação dos ganhos.

5.5 Resultados das Simulações e Experimentais dos Controladores

Para validar os ajustes dos ganhos foram aplicadas ao sistema controlado diferentes entradas de referência de temperatura e estequiometria, de modo a verificar a convergência do

sinal de saída para o valor desejado.

Pode-se observar através das figuras 5.4 a 5.8 que os resultados das simulações e experimentos foram satisfatórios, já que os valores de saída convergiram para os respectivos valores de referência aplicados às entradas de temperaturas e estequiométricas.

Na Fig. 5.4 têm-se, as respostas obtidas pelas simulações da temperatura. Onde são aplicados três degraus diferentes de valores, a fim de validar a estabilidade do sistema para possíveis temperaturas de operação do secador, pois segundo o fabricante Sacmi® a máxima temperatura de operação é 190°C.

Através da Fig. 5.4, está representado pelo gráfico em vermelho a resposta do sistema a uma de temperatura de referência de 50°C, sendo representada em verde, a resposta a um degrau de 100°C e a resposta do sistema a uma temperatura 150°C em azul. É perceptível que o laço de controle da temperatura proporcionou a estabilização nos três degraus em aproximadamente 80 segundos, sem ocasionar sobre sinal ou outras perturbações nocivas ao comportamento do sistema.

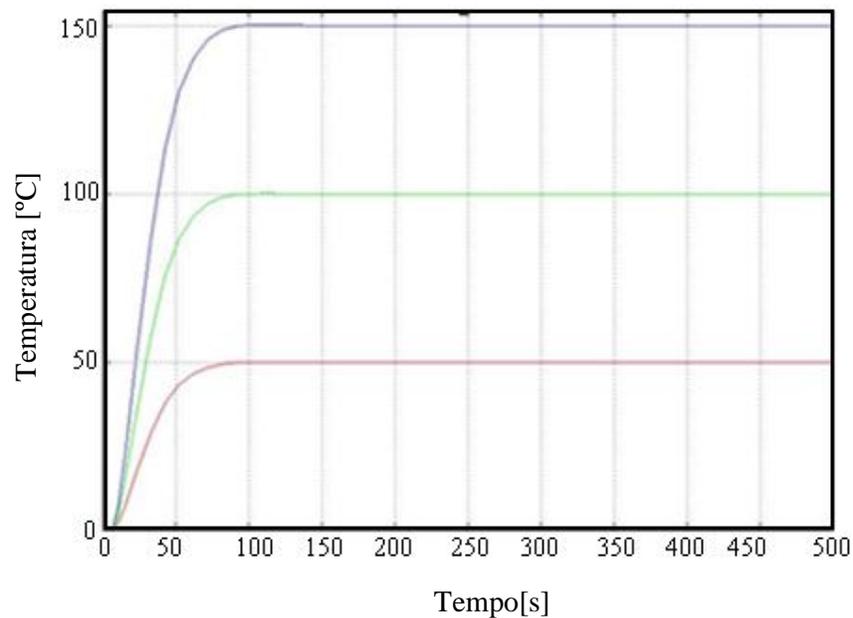


Figura 5.4: Resposta da aplicação de três degraus referente a temperatura.

Com intuito de observar o comportamento da concentração de oxigênio no queimador do secador, através do laço de controle estequiométrico, a Fig 5.5 apresenta a resposta do sistema ao degrau lambda (λ), o qual comparado com o sinal elétrico do sensor de oxigênio equivale ao valor de 2,5 volts. Observa-se que o laço de controle estequiométrico proporcionou a estabilização ao degrau proposto em aproximadamente em 35 segundos, sem ocasionar sobre sinal ou outras perturbações ao sistema.

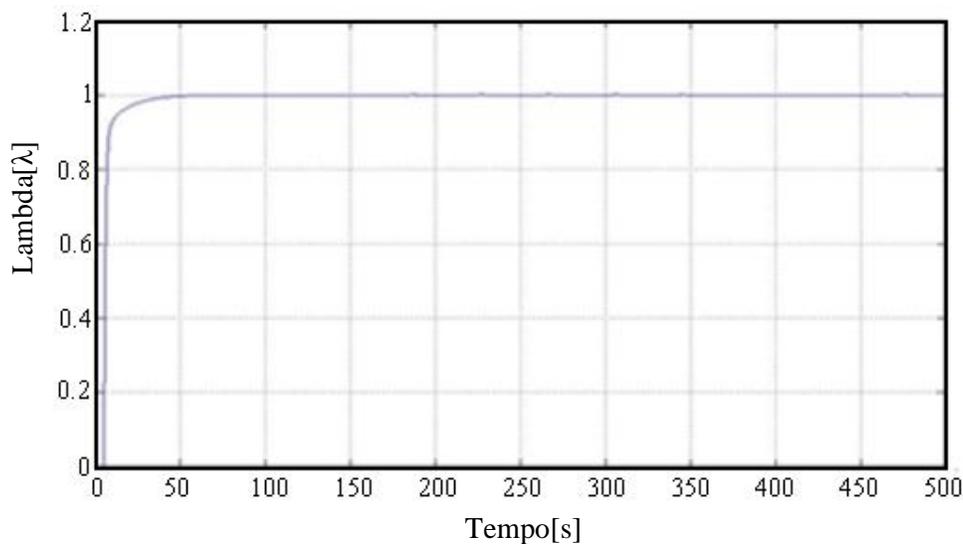


Figura 5.5: Resposta de simulação da aplicação de referência estequiométrica tipo degrau.

Nas Figuras 5.6 e 5.7, apresenta-se o comportamento experimental referente à temperatura do secador, com o protótipo instalado. No primeiro degrau (vide fig.5.4), foi alterado o valor de *setpoint* da temperatura de 92°C para 120°C. Pode-se observar que o tempo de resposta foi de aproximadamente 50 segundos, sem apresentar oscilações de temperatura, mesmo quando este operava com valor de 92°C, ou quando o sistema alcançou o valor de 120°C.

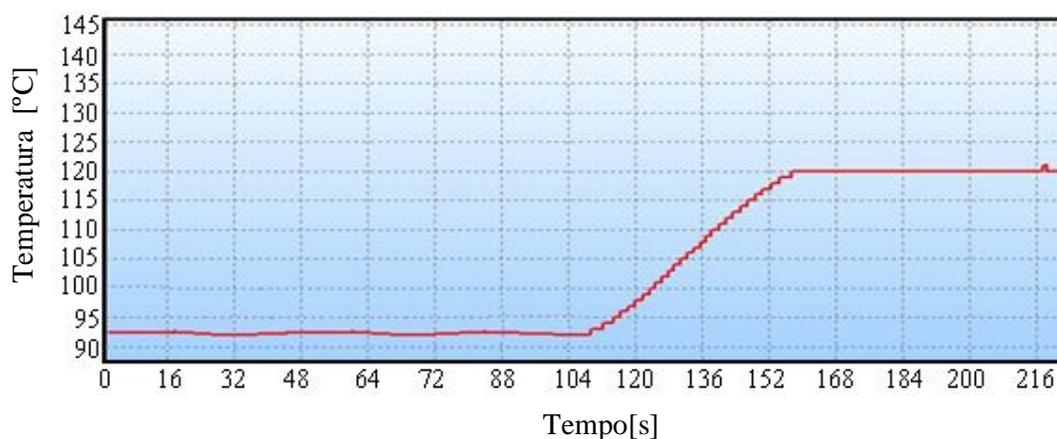


Figura 5.6: Resposta da aplicação de degrau de temperatura.

Na Fig. 5.7, apresenta-se alteração no valor do *setpoint* de 140°C para 100°C. Nesta dinâmica o sistema apresenta um tempo de assentamento aproximado de 60 segundos. Neste caso observa-se que não ocorrem oscilações, tanto nas temperaturas de 140°C e 100°C, deste laço de controle de temperatura, apresenta um comportamento estável, sendo este necessário para evitar defeitos estéticos nas peças cerâmicas ocasionadas pelas oscilações de temperatura, conforme descrito no capítulo 2.

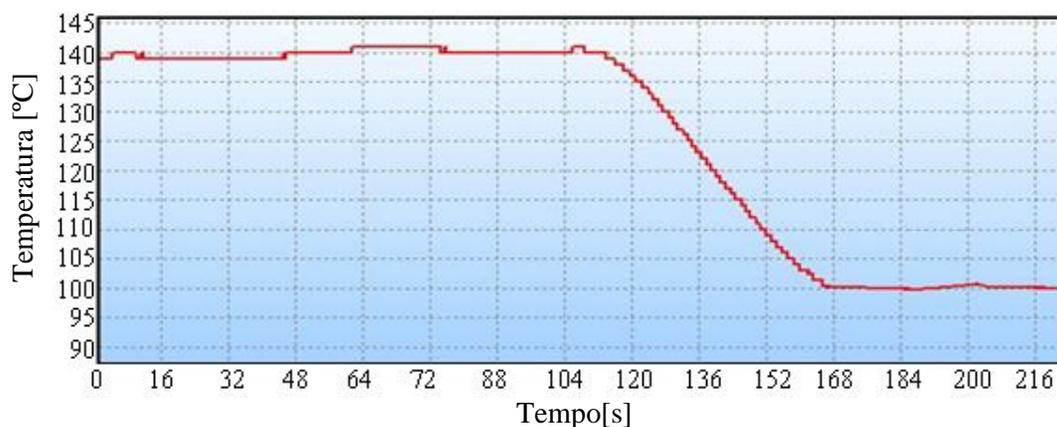


Figura 5.7: Resposta da aplicação de degrau negativo de temperatura.

Através da Fig. 5.8, apresenta-se o comportamento do laço de controle estequiométrico experimental. Observa-se que o comportamento do mesmo é estável e com um erro em regime permanente de aproximadamente 0,2 referente ao valor de Lambda (λ). Este se deve a forma construtiva do queimador, pois sofre influência do ar provido do ventilador de recirculação, aponta-se as alternativas para eliminar o erro em regime no capítulo 7. Conforme é debatido no capítulo 6, o laço estequiométrico, proporcionou uma melhora na mistura combustível+oxidante, apresentando impacto positivo sobre a combustão gás natural.

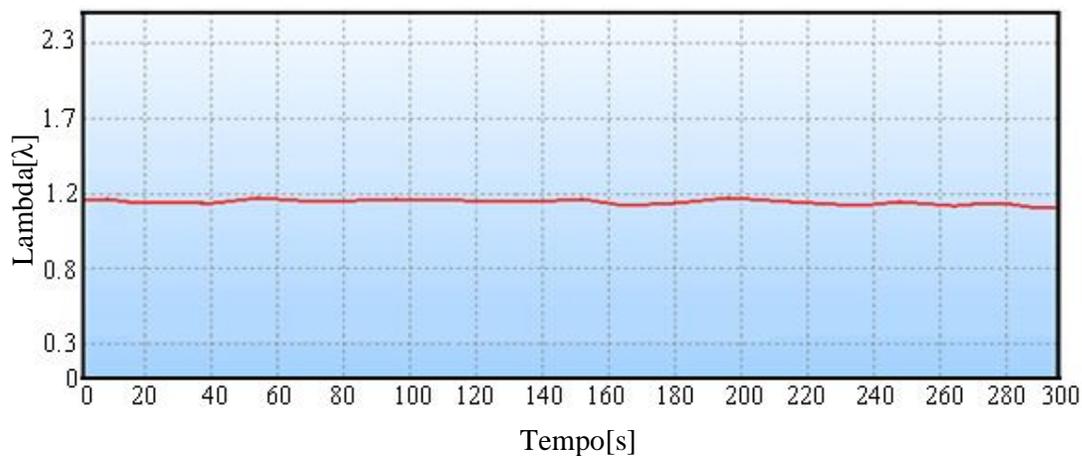


Figura 5.8: Resposta do comportamento sensor de oxigênio.

6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais do controlador em estudo, implementado através de um microcontrolador. Para que fosse possível analisar o desempenho do controlador, ele foi empregado em um secador vertical cerâmico com a finalidade de controlar a temperatura e a relação estequiométrica da combustão. Serão analisados os resultados de emissões de poluentes, consumo de gás natural e a variação da qualidade dos revestimentos cerâmicos.

6.1 Descrição dos Instrumentos

Os instrumentos descritos nesta seção visam validar a aplicação do protótipo desenvolvido para o secador vertical cerâmico e o controle estequiométrico. As variáveis monitoradas são: o consumo de gás natural, O_2 , CO , CO_2 e HC .

6.1.1 Medidor de Vazão

O medidor foi instalado junto à rede de gás natural, responsável pela alimentação do queimador, para que fosse possível mensurar o consumo de gás natural e o comportamento deste perante a utilização do controlador. O medidor de vazão utilizado é o DM10R25, do fabricante Kron Schroder (Fig. 6.1). Este medidor apresenta faixa de leitura compreendida entre a vazão mínima de $1,6 \text{ m}^3/\text{h}$, vazão máxima $16 \text{ m}^3/\text{h}$, e possui um erro máximo de medição de 1%.



Figura 6.1: Medidor de vazão instalado na planta.

6.1.2 Medidores de Emissão de Poluentes

Para realizar as medições necessárias para a determinação das características de emissão de poluentes e da combustão foram utilizados dois analisadores portáteis de gases, o modelo TM132 do fabricante Tecnomotor e o TEMP50 do fabricante Confor, ambos calibrados e aferidos, conforme seus certificados de conformidade e calibração.

O analisador de gases TEMP50 foi utilizado para definir a concentração dos poluentes CO, CO₂ e a concentração O₂. Na tabela 6.1 estão dispostas as características técnicas do mesmo. Para determinar os valores de HC foi empregado o instrumento TM132, através da tabela 6.2 estão apresentadas as características técnicas deste instrumento.

Tabela 6.1: Características técnicas do analisador de gases de combustão TEMP50.

Parâmetro	Tipo de Sensor	Faixa	Resolução	Tempo de Resposta	Limite de Erro
O ₂	Eletroquímico	0 a 25 [%]	0,01 [%vol.]	20 [s]	±0,2 [%vol.]
CO	Eletroquímico	0 a 10.000[ppm]	1 [ppm]	40 [s]	±2[ppm]
CO ₂	Calculado	0 a 99,9 [%]	0,1 [%]	40 [s]	±0,2 [%vol.]

Tabela 6.2: Características técnicas do analisador de gases de combustão TM132.

Parâmetro	Tipo de Sensor	Faixa	Resolução	Tempo de Resposta	Limite de Erro
O ₂	Eletroquímico	0 a 25 [%]	0,01 [%vol.]	20 [s]	±0,1 [%vol.]
CO	Eletroquímico	0 a 15[%]	0,01 [%vol.]	40 [s]	±0,06 [%vol.]
CO ₂	Calculado	0 a 20 [%]	0,1 [%]	40 [s]	±0,5 [%vol.]
NO _x	Calculado	0 a 5000 [ppm]	1 [ppm]		±32[ppm]
HC	Eletroquímico	0 a 20000 [ppm]	1 [ppm]	40 [s]	±6[ppm]

As variáveis medidas por cada analisador estão em função das respectivas faixas de leitura de cada poluente e observando-se as características de emissão dos itens apontados acima, referente à queima do gás natural no secador. Deste modo, com o analisador TMP50 serão medidos os valores de O₂, CO₂, e CO e com o TM132 os valores de HC.

Ambos os analisadores serão empregados para realizar as medições, com o secador operando de maneira original, apenas controlando abertura da válvula de gás, para manter a

temperatura no valor determinado pelos técnicos cerâmicos conforme apresentado no capítulo 2 e, com o protótipo aplicado ao mesmo. Sendo as leituras executadas em dois pontos do secador:

- No queimador, visa-se determinar os valores de O₂, CO₂, CO e HC junto à fonte geradora, e validar a leitura do sensor de sonda *lambda*, com os valores registrados de O₂, pelo analisador;
- Na Chaminé, para analisar a influência nos níveis de O₂, CO₂, CO e HC, em função das entradas de ar secundárias no interior do secador, sendo estas devido às características construtivas e funcionais do mesmo (conforme descrito no capítulo 2). Pois se trata de um ponto de fiscalização executada por órgãos competentes do governo, os quais se restringem à verificar as emissões de poluentes nas chaminés industriais.

6.2 Medições na Chaminé

Para a determinação das características das emissões do secador vertical cerâmico foram realizadas 20 leituras dos gases O₂, CO₂, CO e HC, com a utilização dos dois analisadores citados anteriormente, sendo executadas 10 leituras com cada aparelho, respeitando os limites de operação de cada equipamento.

Em função do número de leituras determinado para caracterizar as emissões na chaminé, foi dividida a abertura máxima da servo válvula, em nove pontos iguais e a rotação do ventilador de combustão iniciou-se com 925rpm e incremento na rotação de 500rpm. Através deste incremento o ventilador de combustão alcançou uma rotação máxima de 4932rpm, para operar em aproximadamente 2300rpm acima da rotação nominal, foi necessário a adequação dos rolamentos e rotor, para suportar a rotação sem danos aos itens mecânicos do mesmo. Na décima leitura buscou-se caracterizar uma mistura rica, aplicando a máxima abertura da servo válvula com a menor rotação do ventilador de combustão (925rpm).

Para obter uma operação em regime permanente no secador e caracterizar um comportamento estável das emissões dos gases, cada leitura foi realizada em intervalos de 30 minutos, tempo identificado como suficiente para estabilização da resposta de emissões.

Depois de cada estabilização da resposta do secador, foram realizados os registros dos gases de exaustão, sendo medidos por períodos de 3 minutos de duração, a uma taxa de amostragem de 10s. Estes registros foram catalogados manualmente. O procedimento descrito está de acordo com as recomendações dos fabricantes, que mencionam que os analisadores de gases não devem efetuar medições em um intervalo contínuo superior a 120 minutos, já que isto pode danificar os sensores eletroquímicos. Através dos parâmetros medidos pelos analisadores

de gases foi estruturada a tabela 6.3, pela qual se pode observar os valores medidos das concentrações percentuais de O₂, CO₂, CO e HC, para diferentes combinações de vazões de gás e ar aplicadas ao secador.

Tabela 6.3: Valores de O₂, CO₂, CO e HC para combinações de abertura da válvula de gás e rotação do ventilador de combustão.

Ângulo de abertura da válvula do gás	Rotação do Ventilador de Combustão (rpm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO(ppm)	HC(ppm)
15	925	20,0	1,0	0,0	0,0
25	1425	19,0	1,0	0,0	0,0
34	1925	20,0	1,0	0,0	0,0
43	2425	19,7	1,0	0,0	0,0
52	2925	20,0	0,0	0,0	0,0
61	3425	20,0	1,0	1,0	0,0
70	3925	19,9	0,0	0,0	0,0
79	4425	20,0	0,0	0,0	0,0
90	4932	20,0	0,0	0,0	0,0
90	925	20,0	1,0	0,8	0,0

As medições realizadas na chaminé do secador, operando através do controle da temperatura (sem o controle estequiométrico) não apresentaram valores expressivos quanto à emissão de poluentes. Esta é uma consequência decorrente do funcionamento normal do secador, pois os gases de exaustão da chaminé não estão apenas associados ao ar utilizado na queima do gás natural.

Os poluentes que são resultados das reações da combustão ocorrida no queimador, quando mensurados na chaminé estão diluídos ao volume excedente de ar. Este volume é oriundo de vários pontos, que são: abertura da entrada e saída das peças cerâmicas do secador (vide figuras, 2.9 e 2.11), a injeção de ar ambiente pelo ventilador de recirculação para suprir o volume de ar úmido retirado pelo exaustor da chaminé. Estes pontos não podem ser eliminados ou minimizados em virtude do funcionamento do mesmo conforme descrito no capítulo 2 e infiltrações de ar ocorridas por deficiências da isolamento do mesmo.

Contudo os poluentes analisados acima, não apresentam valores os quais demandem análise com maior profundidade, em virtude da fiscalização executada por órgãos do governo, os quais executam suas verificações dos níveis de emissões nas chaminés dos equipamentos

industriais. Neste ponto, o secador não apresenta preocupação aos departamentos de engenharia, pois as leituras executadas indicam basicamente oxigênio.

6.3 Medições no Queimador

Através da fixação de um tubo no queimador do secador, conforme descrito a necessidade no capítulo 4 (vide Fig. 4.1), instalou-se o sensor de oxigênio com o objetivo de controlar neste equipamento a temperatura e a relação estequiométrica.

Por meio deste tubo foram realizadas três medições, com o objetivo de determinar os valores de: O₂, CO₂, CO e HC, com o secador operando somente com controle de temperatura, de modo original. Para isto, empregaram-se os dois analisadores portáteis de gases, com a utilização do mesmo procedimento aplicado à chaminé. A tabela 6.4, apresenta os valores medidos referentes aos valores dos itens: O₂, CO₂, CO e HC, os quais caracterizam a eficiência da combustão. Para determinar os itens citados acima, foram adotados três pontos, sendo estes os seguintes pontos:

- Abertura da válvula em 15°, a mínima abertura possível;
- Abertura da válvula em 45°, entre valores próximos a este, que o sistema atual opera quando estabilizado e sem grandes oscilações de fluxo de peças cerâmicas;
- Abertura da válvula em 90°, a máxima abertura da válvula de gás. Esta abertura ocorre quando é aplicado ao sistema grandes oscilações de carga.

Através dos valores apresentados pela tabela 6.4, pode-se perceber que a mistura do combustível+oxidante é caracterizada com uma mistura pobre, o que acarreta em perda de energia térmica e como consequência um maior consumo de gás natural para manter a temperatura do secador no valor determinado pelos técnicos cerâmicos. Isto se deve ao resfriamento da chama, em virtude do excesso de ar.

Tabela 6.4: Valores medidos referentes às concentrações de O₂,CO₂, CO e HC.

Ângulo de abertura da válvula do gás	Rotação do Ventilador de Combustão (rpm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO(ppm)	HC(ppm)
15	3700	19,8	1	152	32
45	3700	13,4	5,8	1300	76
90	3700	6,9	13,4	4570	143

Concluída a etapa de avaliar o comportamento do secador referente a emissões da

combustão, iniciou-se a estimativa do desempenho do mesmo com o protótipo de controle instalado. Aplicou-se nesta etapa a metodologia utilizada nos casos anteriores para a determinação das características de emissão e combustão ocasionadas pelo secador. Para tal levantamento realizaram-se dez medições.

Os dois analisadores citados anteriormente foram utilizados, sendo executadas cinco leituras com cada aparelho, respeitando os limites de operação dos mesmos. Este procedimento tem a finalidade de validar o controle desenvolvido e comprovar, através das leituras as reduções dos níveis de emissão de poluentes, e por consequência a eficiência de combustão em comparação com o sistema original do secador. Essas medições são apresentadas nas figuras 6.2 a 6.5. Sendo cada figura referente a um dos itens: O_2 , CO_2 , CO e HC.

Na Fig. 6.2 pode-se observar os valores medidos das concentrações percentuais de O_2 para as diferentes combinações de vazões de gás e ar aplicadas ao secador.

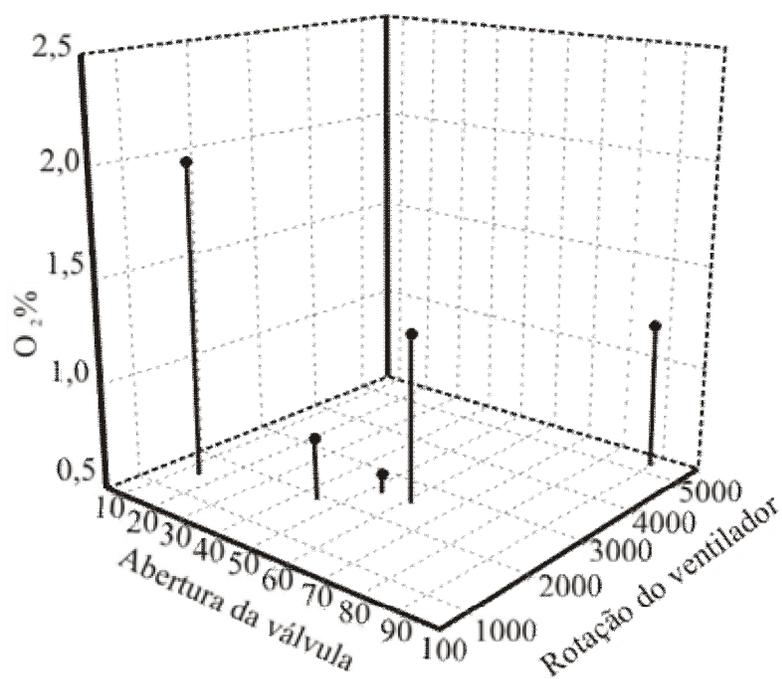


Figura 6.2: Valores médios das concentrações de O_2 (percentual).

A Fig. 6.3 indica os valores médios das concentrações percentuais de CO_2 para as diversas combinações de vazões de gás e ar empregadas ao secador.

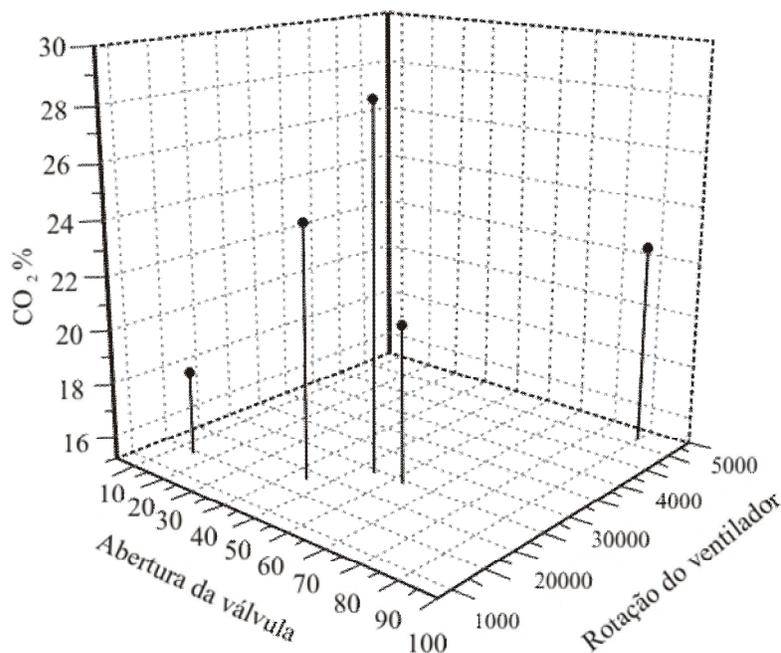


Figura 6.3: Valores médios das concentrações de CO_2 (percentual).

A Fig. 6.4 apresenta os valores médios das concentrações de CO para as diferentes misturas de vazões de gás e ar aplicadas ao secador.

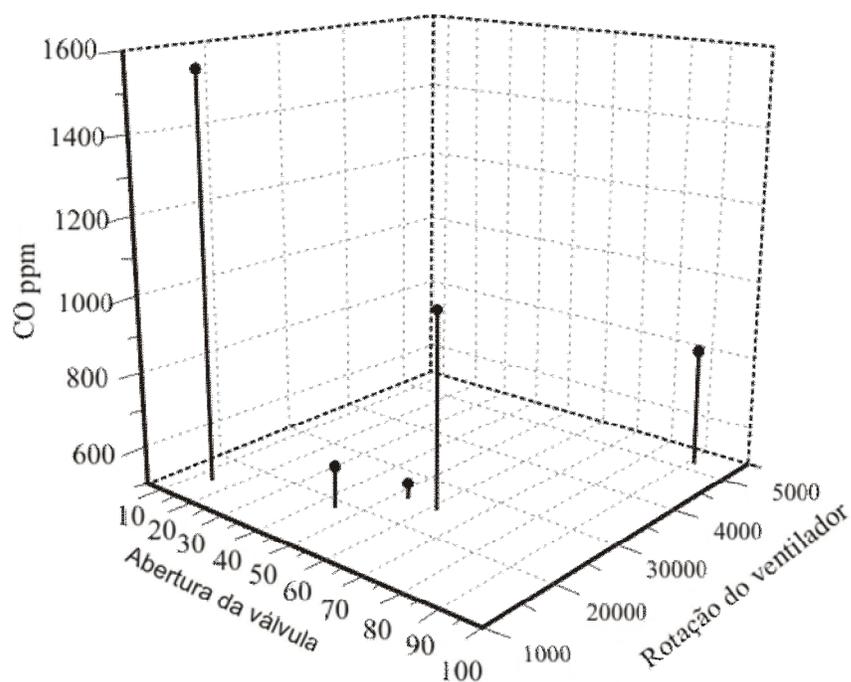


Figura 6.4: Valores médios das concentrações de CO (em ppm).

Através da Fig. 6.5 pode-se observar os valores médios das concentrações de HC para as diferentes combinações de vazões de gás e ar utilizadas secador.

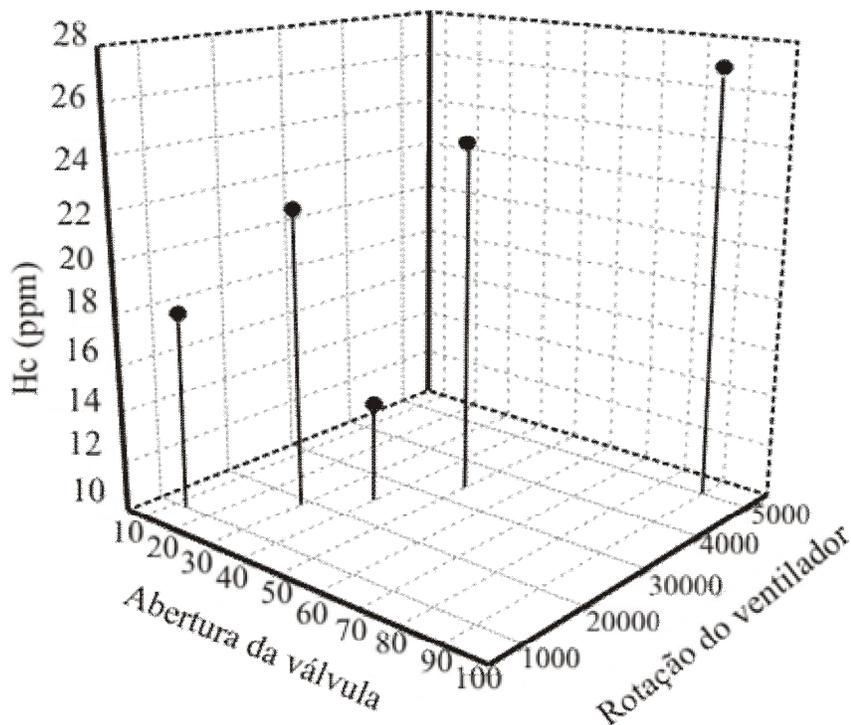


Figura 6.5: Valores médios das concentrações de HC (em ppm).

Após a conclusão da caracterização do sistema com a aplicação do protótipo para o sistema de controle, com objetivo de controlar a temperatura e estequiometrica, é possível observar ganhos relacionados à emissão de poluentes e à mistura combustível+oxidante.

No que se refere à eficiência da combustão, é perceptível a redução do percentual de O_2 , o qual não se associava com o combustível, deste modo, o excesso de ar é reduzido, minimizando o resfriamento da chama, o qual ocasionava o aumento do consumo de gás natural.

Com relação à emissão de poluentes, ocorreu a diminuição dos gases gerados através da queima do gás natural, ressaltando que este desempenho foi atingido sem oscilações perceptíveis na temperatura. As informações referentes a emissões de poluentes e por consequência eficiência da mistura estão sintetizadas na Tabela 6.5. Realizando-se uma comparação dos valores com a Tabela 6.3, a qual retrata a situação de operação original do secador, sem o controle estequiometrico, apresentam redução das emissões e aumento da eficiência da combustão.

Tabela 6.5: Valores medidos aplicando o controle estequiométrico, referentes às concentrações de O₂, CO₂, CO e HC.

Ângulo de abertura da válvula do gás	Rotação do Ventilador de Combustão (rpm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	HC(ppm)
15	925	2	18,2	1560	18
45	1480	0,8	24,3	612	22
54	1850	0,6	28,4	540	14
62	2466	1,3	20,8	1013	24
90	5180	1,2	22,5	815	27

6.4 Consumo de Gás Natural

Considerando-se a importância da indústria de revestimentos cerâmicos no contexto nacional e, o fato do mercado tornado-se mais competitivo a cada dia, qualquer redução do custo de fabricação pode representar ganhos em termos de competitividade, tornando fundamental a busca por novas tecnologias. A diminuição do consumo de energia térmica de uma indústria de revestimentos cerâmicos pode resultar tanto em uma redução de custos, devido a menor demanda energética exigida, quanto num ganho em produtividade, quando é de interesse da empresa manter o padrão da demanda de energia contratada, aproveitando a quantidade de energia que seria economizada, para expandir a produção, investindo em novos equipamentos ou aumentando o número das linhas de produção [Alves et al., (2007)].

A instalação do medidor de vazão junto à rede de gás natural teve o objetivo de mensurar o consumo do secador através de dois métodos. Com secador operando apenas com o controle de temperatura e com o protótipo instalado, controlando além da temperatura a estequiometria do mesmo. Para validar a análise, foi mantido o volume de produção diário e as dimensões das peças cerâmicas, a fim de garantir a comparação dos dois métodos com as menores interferências, que pudessem invalidar a comparação do consumo de gás natural dos métodos.

No primeiro método, o consumo diário registrado foi de 264m³, com um consumo mensal de 7.920m³. Com a utilização do protótipo do sistema para controle simultâneo da temperatura e estequiometria, o consumo diário do secador registrado ficou em 259m³. Para validar este resultado, a aplicação do protótipo foi estendida por quinze dias, resultando em um consumo de 3.886m³, e um consumo mensal estimado de 7.769 m³. Estes dados comprovam uma diminuição do consumo diário de 5m³, gerando uma redução mensal de 150m³. Estes indicadores comprovam a eficiência do protótipo instalado no secador, o qual ocasiona uma economia anual

aproximadamente de U\$644,26.

De acordo com Alves et al, (2007) o percentual da participação da etapa de secagem e queima sobre o consumo de energia térmica na indústria de revestimentos cerâmicos é possível observar que o consumo da etapa de queima, representa cerca de 80% do total de gás natural consumido pela fábrica, ou seja, o consumo dos fornos atinge valores até quatro vezes maiores do que os apresentados pelos secadores. As etapas de secagem e queima juntas são responsáveis por 95,5% do consumo energético total.

Através dos dados levantados por Alves et al, (2007), é apontado a relevância do estudo desenvolvido neste trabalho a fim de contribuir na redução do consumo do gás natural na etapa de secagem, que conforme citado acima corresponde a 20% do total consumido por uma planta fabril de revestimento cerâmicos.

6.5 Efeitos Sobre a Qualidade Final dos Revestimentos Cerâmicos

Como uma consequência da queda de considerável parte das barreiras políticas, o barateamento e melhoria das condições de transporte de longa distância, a globalização da economia tornou-se uma realidade. Dentro desse novo cenário a indústria cerâmica compete agora, tanto no mercado interno como no externo, com um número cada vez maior de produtos originários das mais diversas regiões do globo. Para que esta possa sobreviver e prosperar nessa nova realidade, é fundamental que todo esforço seja feito no sentido de melhorar a competitividade dos produtos, no aspecto de qualidade e custo de produção.

Diante deste cenário, a implementação do protótipo no secador vertical cerâmico, vem ao encontro de viabilizar a redução no consumo de gás natural utilizado na produção, conforme mencionado acima, quanto no aumento da qualidade final das peças cerâmicas, devido à redução dos defeitos estéticos ocasionados pelas oscilações de temperatura do secador descrito no capítulo 2.

Os ganhos na qualidade final das peças cerâmicas são decorrentes da validação da proposta de controle da temperatura e estequiometria apresentada no capítulo 5. Pois através da aplicação desta, foi possível atingir uma maior estabilidade na temperatura de secagem necessária para o correto funcionamento desta etapa, segundo os técnicos cerâmicos. Tal estabilidade proporcionou as peças na saída do secador com menor variação do percentual de umidade residual, ficando dentro dos limites exigidos para o funcionamento correto das etapas posteriores. Fornecendo a esmaltação peças com maior resistência mecânica minimizando o surgimento de defeitos estéticos tais como: Ra, covinha e furinho.

A validação dos resultados pertinentes a qualidade final das peças cerâmicas foi comprovada com a implementação do protótipo no secador em um intervalo de dez dias. Durante este período foi acompanhado o desempenho do mesmo, em manter estável a temperatura de secagem e os índices dos indicadores dos defeitos estéticos relacionados a esta etapa.

Em função dos dados adquiridos no período de dez dias, os mesmos foram comparados com os indicadores de qualidade dos dez dias anteriores a instalação do protótipo. Este intervalo de comparação de vinte dias foi utilizado em função que o material produzido ao longo deste período foi o mesmo. Buscou-se este período, para evitar comparar dois produtos com características diferentes, em função da possibilidade de mudanças na formulação dos mesmos.

O resultado desta análise ao longo do intervalo, entre o funcionamento original do secador e a instalação do protótipo, considerando os defeitos descritos acima, constatou-se uma redução de 1% na quantidade (por m²) de peças classificadas em qualidade “C” em função das peças com qualidade “A”.

7 CONCLUSÕES

O presente trabalho constitui-se de um estudo sobre o controle térmico e estequiométrico de um secador vertical de ciclo contínuo para revestimentos cerâmicos, visando levantar subsídios teóricos para o projeto do controlador, além de uma revisão bibliográfica.

Realizou-se o estudo para determinação de um modelo matemático através da identificação experimental do secador. Assim, o comportamento do processo de secagem foi representado através de um modelo de segunda ordem com atraso de fase.

Na implementação do protótipo do sistema de controle foram aproveitados componentes já existentes na planta acrescidos de um sensor de oxigênio e de um inversor de frequência para controlar a velocidade do ventilador de combustão. A integração da instrumentação com os elementos de potência é feita através de um microcontrolador, que através de um *software* de supervisão instalado em um microcomputador possibilita ao operador observar o desempenho do sistema e atuar sobre o controle de temperatura.

Com a conclusão da instalação dos dispositivos e do protótipo no secador, foram realizados experimentos com o intuito de validar o funcionamento do sistema. Os resultados obtidos podem ser sintetizados através da melhoria da qualidade final do produto, que representam um aumento de 1% na qualidade final do processo devido à diminuição dos defeitos do tipo “covinha, Ra e furo”, defeitos estes oriundos de uma má secagem e no desempenho da combustão através da economia de 2% em gás natural, monitorada através de um medidor de vazão na rede de alimentação de gás natural do secador.

Foram também realizados testes para determinação da eficiência do controle de temperatura e estequiometria. A validação do controle da temperatura foi feita através da verificação da convergência da temperatura para o valor de referência desejado com um erro em regime de aproximadamente 3%. O controlador desenvolvido também propiciou uma diminuição de emissões dos gases nocivos da combustão medidos no queimador.

O resultado do controle, referente a emissões mostrou que a implantação do sistema de controle estequiométrico proporcionou a redução das emissões de CO, CO₂ e HC, comparado ao sistema de operação original do secador. Esta redução nos níveis de emissões é um indicativo da melhora da eficiência da mistura entre o combustível e o comburente, possibilitando uma combustão próxima da estequiométrica.

Conclui-se finalmente que o trabalho atingiu as metas propostas de desenvolver um controlador de temperatura e estequiometria para secador vertical e que a metodologia proposta nesta dissertação, pode ser aplicada em trabalhos futuros na indústria cerâmica de revestimentos,

por exemplo, nos demais secadores, nos atomizadores e, principalmente, nos fornos, que são parte fundamental do processo cerâmico.

7.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros

- Aprofundamento da modelagem do sistema;
- Estudo entre eficiência térmica e emissões;
- Medição, sensoriamento e controle da concentração de mais gases poluentes;
- Adequação do protótipo desenvolvido para outros equipamentos térmicos cerâmicos, tais como atomizadores e fornos;
- Integração com outras técnicas de controle de combustão;
- Análise da influência da combustão, separando o queimador do duto da recirculação de ar.

8 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Alves, Helton José; Melchiades, Fábio Gomes; Boschi, Anselmo Ortega, 2007. **“Levantamento Inicial do Consumo de Energias Térmica e Elétrica na Indústria Brasileira de Revestimentos Cerâmicos”**. Cerâmica Industrial, São Paulo, p.17-21, 05 abr. 2007.

American Gas Association, 1967. **“Gas engineers handbook”**. New York, Industrial Press. Cap.5, seção 2, p. 2/46-2/99: Combustion of gas .

Banco Mundial, 1998. **“Brasil: Gestão dos Problemas da Poluição”**. A agenda ambiental marron, volume 1: relatório de política. Relatório n.16635-BR. Diretoria sub-regional Brasil.

Bazzo, E.,1992. **“Geração de Vapor”**, Editora da UFSC, Florianópolis.

Biffi, Giovanni, 2000. **“Defeitos de fabricação das placas cerâmicas”**.

Buneno, Marcelo Lemes; Stemmer, Marcelo Ricardo; Borges, Paulo Sérgio da Silva, 2000. **“Inspeção Visual Automática de Peças Cerâmicas”**. Cerâmica Industrial, São Paulo, p.29-37, 05 set. 2000.

Bristot, Vilmar Menegon, 2002. **“Controle de Temperatura de Secadores de Revestimentos Cerâmicos Alimentados a Gás Natural”**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina.

Bristot, Vilmar Menegon, 1996. **“Máquinas e Equipamentos para Cerâmica”**. 1.ed. Criciúma, Editora Santa Catarina.

Carvalho, João Andrade Jr. e Mcquay, Mardson Queiros, 2007. **“Princípios de Combustão Aplicada”**, Editora UFSC, Santa Catarina.

Coelho, Antonio Augusto Rodrigues; Coelho, Leandro Dos Santos, 2004. **“Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares”**, Editora UFSC, Santa Catarina.

Davies R.M. Oeppen B., 1972. **“Combustion and Heat Transfer in Natural Gas Fired Boilers”**. J. Inst. Fuel, v.45, n.377, p.383-390, 1972.

Fogarty, T.C. e Bull, L., 1995. **“Optimising individual control rules and multiple communicating rule-based control systems with parallel distributed genetic algorithms”**, IEEE.

Franchi, Claiton Moro, 2008. **“Acionamentos Elétricos”**, Editora Erica, São Paulo.

Garcia, Roberto, 2002. **“Combustíveis e Combustão Industrial”**, Editora Interciência, Rio de Janeiro.

Gil, W.; Carvalho, J.A.; Bastos-Netto, D., 1987. **“Termodinâmica da Combustão”**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos.

Goldemberg, J.; Johansson, T.B.; Reddy, A. K. N.; Williams R.H., 1983. **“Energy for a Sustainable World”**, Delhi Wiley Eastern.

Glassman, I., 1996. **“Combustion”**, Academic Press, San Diego.

Heywood, J. B., 1988, **“Internal Combustion Engine Fundamentals”**, McGraw-Hill.

Kingery, D.W.; 1998. **“La Transición de la Cerámica desde el Oficio Artesanal a la Industria basada em la Ciencia”**. V Congreso Mundial de la Calidad de Azulejo y del Pavimento Ceramico, (Mar. 1998 : Castellón, España). Anais. Qualicer 98, p.3-17.

Kuo, K. K., 1986. **“Principles of combustion”**, Wiley-Interscience, New York.

Lehmkuhl, Willian Anderson., 2004. **“Análise Numérica e Experimental de um Secador Contínuo Tipo Túnel Utilizado na Indústria de Cerâmica Vermelha”**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 113 p. 2004.

Leston, Luciano Anacker, 2007. **“Diminuição das Emissões de Poluentes Através do Controle de Combustão em Malha fechada de Fronos a Gás”**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia.

Linpo Technology. Disponível em: < <http://www.linpo.com>>. Acesso em 05 de abr. 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.

Mendes P. R. C.; Richter C. M., Tavares M. C., 2007 **“Software for Embedded Controllers Design: Aplicacion to a Caloric Stimulador for Electronystagmography”**. The IV Latin American Congress on Biomedical Engineering, 2007

Melchiades, Fábio G. et al., 2001. **“Controle Dimensional e do Formato de Revestimentos Cerâmicos. Parte I: Dimensões”**. Cerâmica Industrial, São Paulo, n. , p.27-33, 05 out. 2001.

Microchip. Disponível em: < <http://www.microchip.com>>. Acesso em 08 de out. 2007.

Modesto, Cláudio de Oliveira. Menegalli, Gilson Bez Fontana, 2001. **“Processo de Fabricação”**. Cocal do Sul, p. 96.

Pinheiro, Paulo César da Costa e Valle, Ramon Molina, 1995. **“Controle de Combustão: Otimização do Excesso de Ar”**. In II Congresso de equipamentos e automação da indústria química e petroquímica, Rio de Janeiro, 1995.

Queiroz M. Schimitt et al., 1988. **“Produção de Proteína a Partir de Gás Natural”**. Boletim Técnico da Petrobrás, v.31, n.4, Parte 1 p.291-302, Parte 2 p.283-290, Out/Dez 1988.

Sacmi; 1996. Catalogo: **“Essicatoio Verticale Automatico EVA 140”**. Ímola - Italy.

Sbarbaro, D.; Zawads, A. e Farias, O., 2002. **“Monitoring and Characterization of Combustion Flames by Generalized Hebbian Learning”**, IEEE.

Sears Roebuck and Company, 1977. **“Basics of combustion and venting”**.

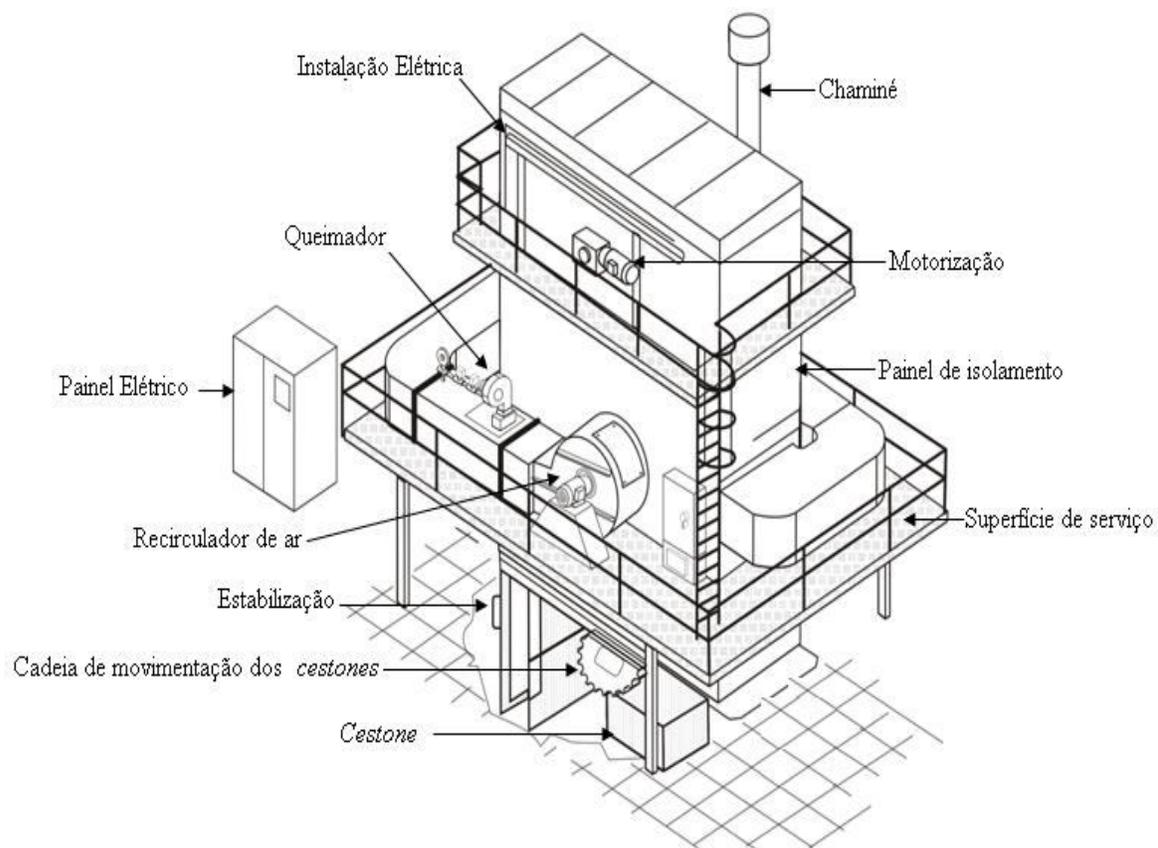
Subramanian, T.K.; Cagelosi, J.V. , 1989. **“Predict Safe Oxygen in – be more Confident that Process Equipment is Ready for Maintenance Work.”** Chemical engineering, v. 96, n.12, p.108-113.

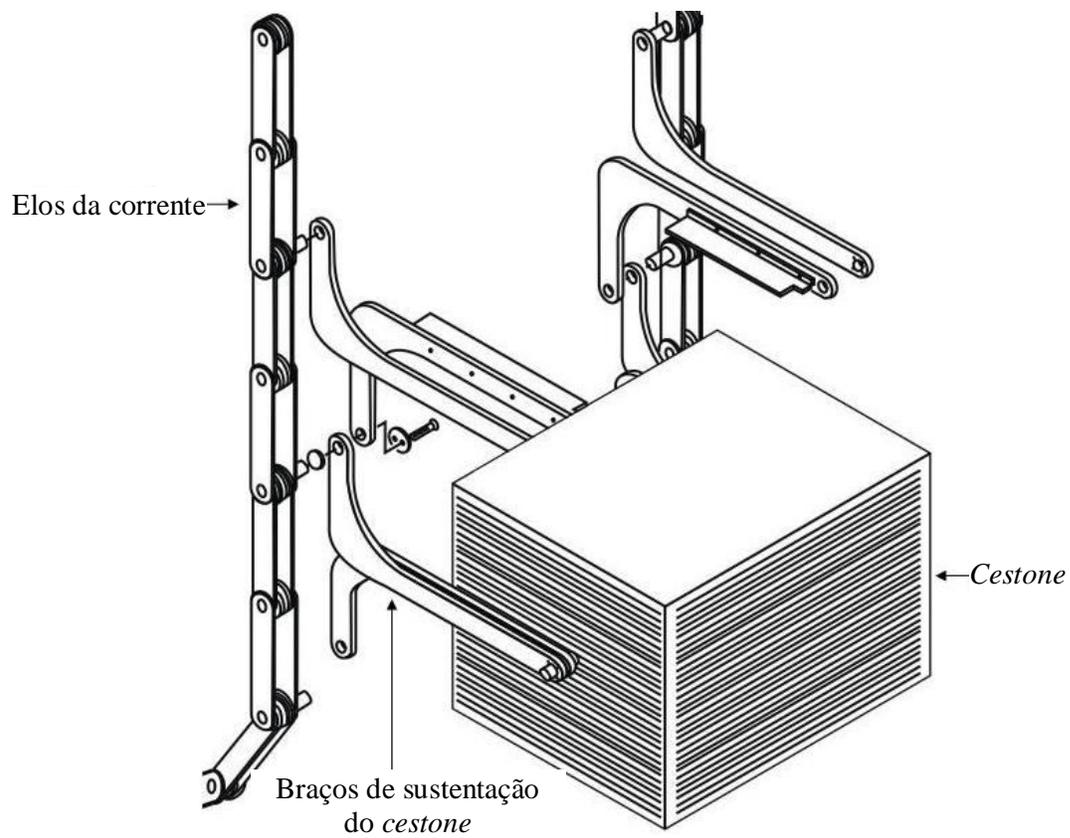
Wenjiang, Liu; Shuming, Zhang e Hongwei, Ye, 1993. **“Measurement and Control of Combustion Process of Industrial Furnaces”**, IEEE.

Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos (YPFB). Santiago, 2000

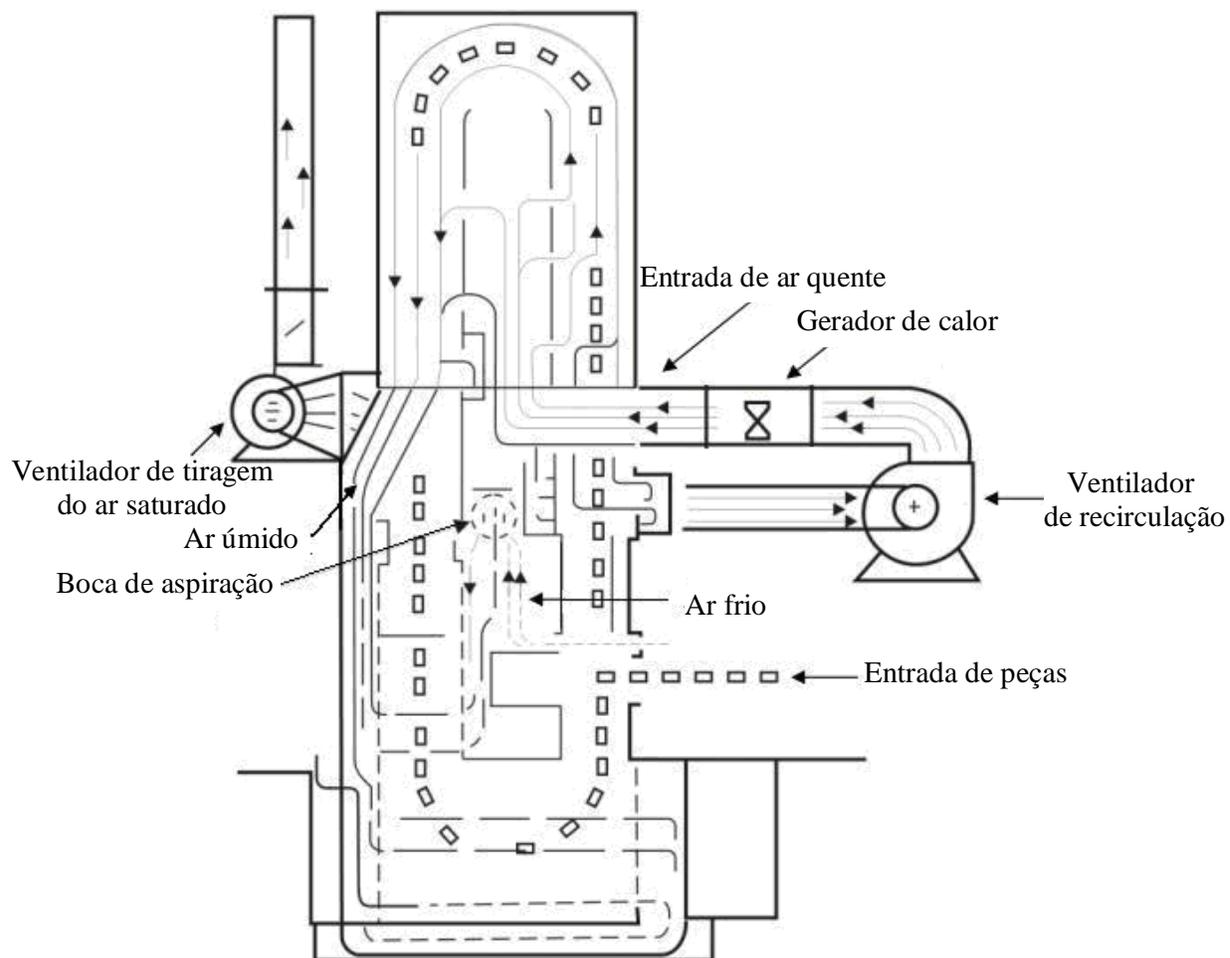
Zeitronix. Disponível em: < <http://www.zeitronix.com>>. Acesso em 05 de abr. 2007.

Apêndice 1: Secador vertical contínuo.



Apêndice 2: Montagem do *cestone* nos braços de fixação da corrente.

Apêndice 3: Circulação de ar e movimentação de peças no secador.



Apêndice 4: Exemplos de comportamentos da temperatura no secador

